



# UNIVERSIDAD DE LA CORUÑA

## GRADO EN ARQUITECTURA TÉCNICA



### ESTUDIO DE PATOLOGÍAS, TÉCNICAS DE DIAGNOSIS, RESTAURACIÓN Y CONSERVACIÓN DE MATERIALES PÉTREOS.



**TRABAJO DE FIN DE GRADO**

**Autor: Manuel Sanjuán Carracedo**

**Tutor: Ramón Vázquez Fernández**

**Convocatoria de Julio 2013**



## RESUMEN

Este trabajo fin de grado está basado en el estudio de las distintas patologías, alteraciones, o lesiones de los materiales pétreos utilizados en construcciones de relevancia histórica o artística, así como también en las diferentes técnicas de diagnóstico, y los correspondientes tratamientos de restauración y conservación, todo ello está precedido de una introducción donde se analiza el origen, la composición y los usos de estos materiales.

Palabras clave:

Rocas, piedras, patologías, tratamientos y restauración.

## ABSTRACT

This final project is based on the study of various diseases, disorders, or injuries of stone materials used in the construction of historical or artistic significance, as well as different techniques of diagnosis, and treatments for restoration and conservation, all of which is preceded by an introduction which discusses the origin, composition and uses of these materials.

Key words:

Stones, injuries, treatments and restoration.



## ÍNDICE

OBJETO .....	6
CAPITULO I. LAS ROCAS COMO MATERIAL GEOLÓGICO	
1. INTRODUCCIÓN .....	9
2. MINERALOGÍA .....	11
2.1. Génesis Mineralógica .....	12
2.2. Propiedades .....	14
2.3. Clasificación .....	21
2.4. Uso.....	22
2.5. Minería.....	22
3. ORIGEN Y FORMACIÓN DE LAS ROCAS.....	24
3.1. Rocas Ígneas.....	29
3.2. Rocas Sedimentarias.....	31
3.3. Rocas Metamórficas .....	40
CAPITULO II. LAS ROCAS COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN	
1. INTRODUCCIÓN .....	54
2. EXTRACCIÓN Y LABRADO.....	63
3. APLICACIONES.....	71
3.1. Fábricas.....	71
3.1.1. Tipos de piezas .....	71
3.1.2. Tipos de fábricas.....	74
3.2. Pavimentos .....	80
3.2.1. Tipos de pavimentos.....	80
3.2.2. Tipos de elementos.....	84
3.3. Cubiertas.....	86
3.4. Aplacados.....	88
4. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LA PIEDRA.....	92
4.1. Caracterización en función de usos de obra.....	83
4.2. Técnicas, análisis y ensayos.....	97

## CAPITULO III. PATOLOGÍAS, ALTERACIONES, DIAGNOSIS, TRATAMIENTO Y CONSERVACIÓN

1. FACTORES DE ALTERACIÓN.....	112
1.1. Factores intrínsecos.....	113
1.2. Factores químico ambientales.....	116
1.3. Factores ambientales.....	129
1.4. Factores biológicos.....	136
1.5. Factores de tensión.....	140
1.6. Factores de incompatibilidad.....	141
1.7. Factores de uso.....	141
2. PATOLOGÍAS Y ALTERACIONES DE LAS ROCAS.....	143
2.1. Alteraciones en las rocas.....	144
2.2. Alteraciones en las estructuras relacionadas con la degradación de materiales .....	162
2.3. Alteraciones por vibraciones y dilataciones .....	171
2.4. Alteraciones producida por la oxidación de elementos de hierro.....	177
2.5. Alteraciones producidas por intervenciones inadecuadas.....	179
3. DIAGNOSIS .....	183
3.1. Análisis in situ.....	187
3.2. Cartografías.....	191
3.3. Técnicas instrumentales.....	194
3.4. Técnicas no destructivas .....	201
3.5. Diagnósis de laboratorio.....	208
4. TRATAMIENTO .....	214
4.1. Limpieza.....	217
4.2. Consolidación.....	247
4.2.1. Características.....	248
4.2.2. Clases.....	253
4.2.3. Métodos de aplicación.....	259
4.3. Hidrofugación.....	262
4.3.1. Características.....	264
4.3.2. Clases.....	265
4.4. Sustitución y reposición .....	269
4.5. Reintegración y reconstrucción.....	270





5. MANTENIMIENTO Y PREVENCIÓN .....	274
CONCLUSIONES .....	275
GLOSARIO .....	276
ÍNDICE DE IMÁGENES .....	282
ÍNDICE DE TABLAS.....	292
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	292
BIBLIOGRAFÍA.....	293
AGRADECIMIENTOS.....	294



## OBJETO

La piedra extraída directamente de la Naturaleza es uno de los materiales más antiguos utilizados por el hombre en sus construcciones, han tenido un papel clave en el desarrollo de las civilizaciones, desde las construcciones de carácter privado hasta las obras civiles, consolidándose como uno de los materiales de construcción más usados y más duraderos, conservándose salvo excepciones en muy buen estado gracias a sus magníficas características para su empleo en obra. Estas características definen su carácter pétreo, siendo estos, materiales que destacan por su gran resistencia mecánica a compresión y su resistencia a los agentes atmosféricos. Las rocas tienen además un gran valor como elementos decorativos y son la materia prima de casi todos los materiales de construcción.

Por ello en la actualidad contamos con innumerables edificaciones, monumentos y cascos urbanos compuestos principalmente por materiales de este tipo, lo cuales no son indiferentes al paso del tiempo y requieren una serie de medidas para su mantenimiento y conservación.

En este deber de conservación del patrimonio, debemos asegurar que nuestras construcciones cumplen su función, así como sus condiciones de seguridad, salubridad y ornato.

En consecuencia a esto, en este Trabajo Fin de Grado realizaremos un estudio pormenorizado del material pétreo natural usado en construcción, realizando así un estudio con la clasificación, el uso, las patologías y las diferentes medidas de recuperación y restauración de dichos materiales, todo ello apoyado con ilustraciones de casos reales.

Siendo conscientes de que es un tema muy manido, con este trabajo no trataremos de aportar luz, si no recopilaremos información para realizar una guía de uso personal que pueda servir como referencia en un futuro profesional, basado en la recuperación y el mantenimiento del parque inmobiliario.

El trabajo está dividido en tres capítulos, en la primero a modo de introducción tratará la petrogénesis, es decir, la ciencia que estudia el origen de las rocas, así como sus diferentes variantes en función de cada proceso geológico, en función de estas variantes obtendremos una serie de rocas que serán vitales en los procesos constructivos y que serán objeto de estudio en la segunda parte del trabajo.

En esta segunda parte se estudiarán los materiales pétreos en estado natural, que son utilizados en construcción, detallando los diferentes procesos de manufacturación, las características, y los usos.

En el tercer apartado veremos los factores de alteración, las patologías y las diferentes soluciones de diagnosis, recuperación, restauración y conservación. Éste apartado será la piedra angular del trabajo, analizando la multitud de técnicas actuales, así como los procedimientos antiguos y más en desuso. Es importante

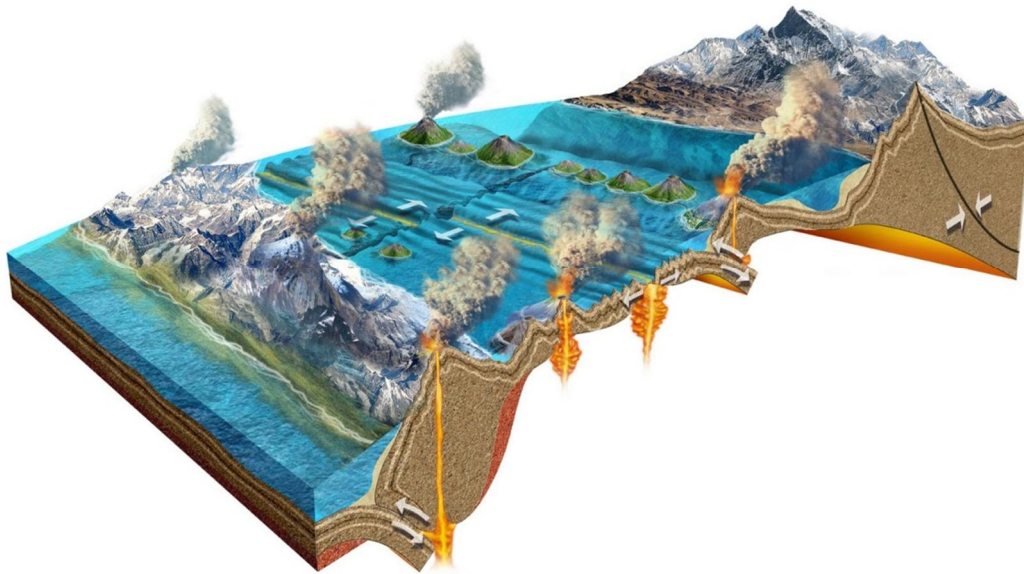


destacar que el estudio únicamente se hará en materiales pétreos naturales integrados en la arquitectura.

Por último se realizará un manual de procedimientos, independiente del resto del trabajo, en la cual condensaremos todo lo expuesto anteriormente de tal forma que se realizará un pequeño manual sobre restauración y conservación de materiales pétreos de relevancia histórica, tratando de ser lo más sencillo y comprensible posible.

# CAPITULO I.

## LAS ROCAS COMO MATERIAL GEOLÓGICO





## CAPITULO I .LAS ROCAS COMO MATERIAL GEOLOGICO

### 1. INTRODUCCIÓN. DEFINICIÓN MATERIALES PÉTREOS.

Antes de comenzar a estudiar el origen de los materiales pétreos es fundamental saber qué es lo que son, tanto desde un punto de vista químico como mineralógico.

En geología se llama material pétreo o rocas a una asociación de uno o varios minerales, de naturaleza inorgánica, heterogénea, de composición química variable, sin forma geométrica determinada y como resultado de un proceso geológico definido.

Los materiales pétreos dada su heterogeneidad pueden ser simples o compuestos.

Simple, es cuando está compuesta de un solo tipo de mineral: monominerálica, por ejemplo: la piedra CALIZA compuesta de calcita<sup>1</sup>, un buen ejemplo de piedra caliza es el mármol, también tenemos la CUARCITA, en su mayoría compuestas por al menos en el 90% de cuarzo<sup>2</sup>.



Imagen 1. Piedra caliza. Mármol.

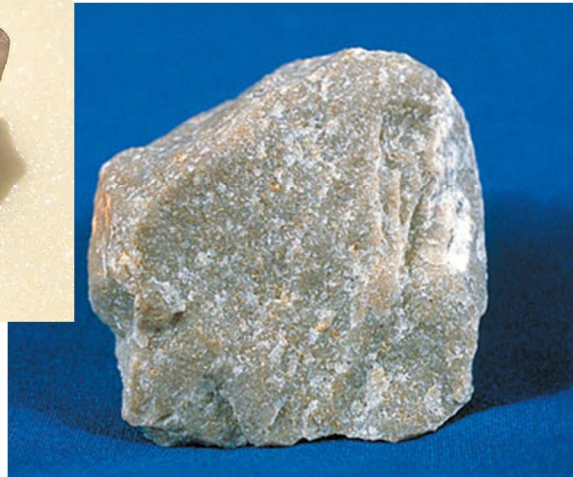


Imagen 2. Cuarcita.

<sup>1</sup> La calcita es un mineral de la clase 05 de la clasificación de Strunz, los llamados minerales carbonatos y nitratos. La calcita es muy común y tiene una amplia distribución por todo el planeta, se calcula que aproximadamente el 4% en peso de la corteza terrestre es de calcita. Presenta una variedad enorme de formas y colores. Se caracteriza por su relativamente baja dureza (3 en la escala de Mohs) y por su elevada reactividad incluso con ácidos débiles. Fuente: <http://webmineral.com/data/Calcite.shtml>

<sup>2</sup> El cuarzo es un mineral compuesto de sílice ( $\text{SiO}_2$ ). Tras el feldespato es el mineral más común de la corteza terrestre estando presente en una gran cantidad de rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias. Se destaca por su dureza y resistencia a la meteorización en la superficie terrestre. Fuente: <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/486427/quartz>

Compuesta, es cuando la roca está conformada por varios tipos de minerales: poliminerállica, un buen ejemplo es: el GRANITO, compuesto principalmente de cuarzo, feldespato, mica y otros minerales en menor cantidad como, anfíbol apatito y circón.



*Imagen 3.Roca Poliminerállica. Granito.*

Estos son materiales naturales que constituyen la corteza de la Tierra. Algunas son relativamente blandos, es decir, débiles y fácilmente deformables. Otros, sin embargo, son duros, fuertes y resistentes.

En la Naturaleza se encuentran formando masas de donde se extraen en explotaciones denominadas canteras.

Al ser la Litosfera la capa más superficial del planeta, de ella se obtienen las rocas destinadas a construcción, estando formadas básicamente por silicatos de aluminio, aunque también existen otra serie de compuestos que dan lugar a una gran variedad de rocas en cuanto a composición y características.

Los materiales pétreos en la construcción se pueden utilizar como:

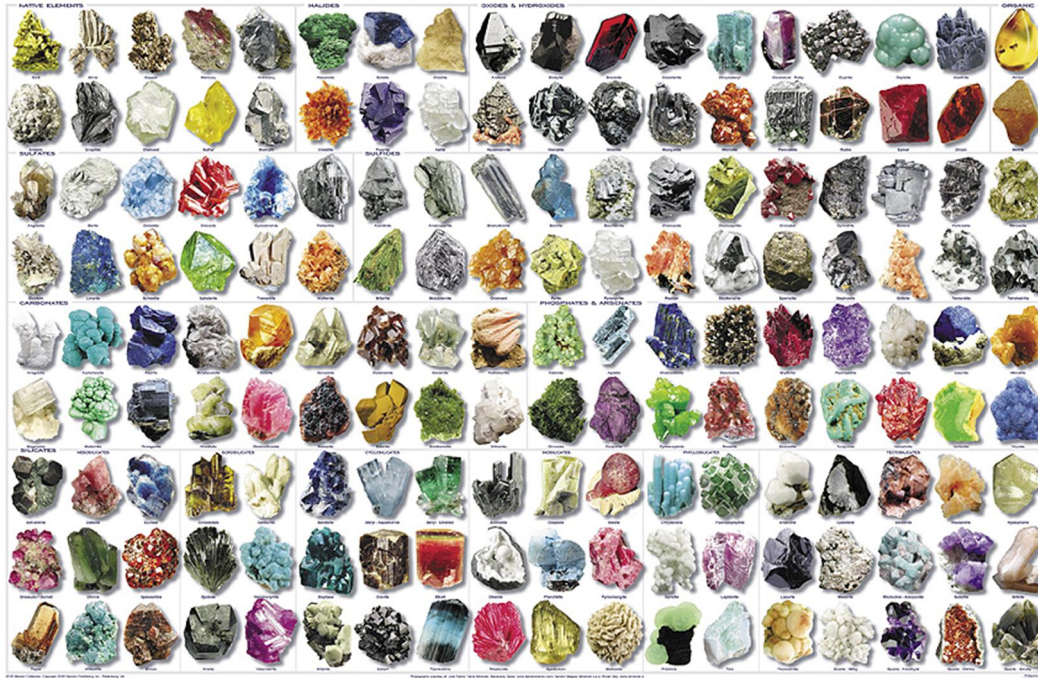
- Elemento resistente.
- Elemento decorativo.
- Materia prima para la fabricación de otros materiales (hormigón, cerámicos, cementos, yesos, vidrio, etc.)

A toda piedra natural debe exigírsele:

- Composición homogénea.
- Que carezca de grietas, coqueas o cavidades.
- Que sea sana, es decir, que no esté alterada.
- Que no sufra alteraciones con los agentes atmosféricos.
- Que no sea heladiza, es decir, que lo afecten las heladas.

## 2. MINERALOGÍA.

Para entender cómo se comportan las rocas es necesario analizar de qué están compuestas y qué propiedades tienen esos compuestos, en este apartado analizaremos el comportamiento de dichos compuestos, Los Minerales.



Los elementos químicos aparecen raramente puros en la Naturaleza, ya que lo hacen formando combinaciones entre sí, denominadas minerales. Un mineral es un sólido inorgánico natural, con una estructura interna específica (*esto es, los átomos constituyentes tienen un ordenamiento o arreglo específico que define un modelo geométrico definitivo*), y una composición química que varía sólo dentro de ciertos límites (*la combinación específica de los elementos constituyentes puede ser expresada en una fórmula química*). Cada tipo de mineral es estable sólo bajo condiciones específicas de presión y temperatura.

Como se ha visto, las rocas naturales están compuestas por uno o varios minerales, los cuales pueden ser esenciales, es decir, típicos y característicos de cada roca, o secundarios cuando solamente determinan variedades de la misma.

Los minerales son sustancias naturales, inorgánicas, de composición química fija dentro de ciertos límites, con propiedades características y con una estructura cristalina. Normalmente son sólidos, aunque hay excepciones.

En la naturaleza hay descritos más de 2000 especies minerales diferentes, aunque los más importantes no superan la centena.

Los minerales suelen tener formas geométricas, colores y brillo bastante llamativos y totalmente naturales, de ahí la curiosidad y fascinación que ejercen sobre las personas



que los contemplan. Sus formas y colores son muy variables hasta el punto de que ningún mineral es exactamente igual a otro en el mundo.

## 2.1. Génesis Mineralógica.

En la naturaleza podemos encontrar 118 elementos, estos al combinarse forman compuestos, estos en combinaciones más complejas dan lugar a todo lo que conocemos, y entre lo que conocemos como no, se encuentran los minerales.

La química es una ciencia compleja y no es objeto de este proyecto, con lo cual no profundizaremos en el tema.

La materia está compuesta por átomos, estos al juntarse forman lo que se conoce como moléculas que a su vez constituyen los elementos y que son estos, pues un elemento sustancia que no puede ser descompuesta, mediante una reacción química en otras más simples, por ejemplo el Hidrógeno, este está compuesto por 2 átomos de hidrogeno que forman una molécula de hidrogeno. La combinación de varios elementos dará lugar a un compuesto más complejo, como por ejemplo el agua, compuesta por dos átomos de hidrogeno y uno de oxigeno ( $H_2O$ ) que conforman una molécula de agua, la unión de infinitésimas moléculas conforma la materia.

Esto mismo se aplica en la formación de minerales:

ELEMENTOS (Si, O, Ca, C) => COMBINACIONES ( $SiO_2$ ) => MINERALES (Cuarzo) => ROCAS (Cuarcita).

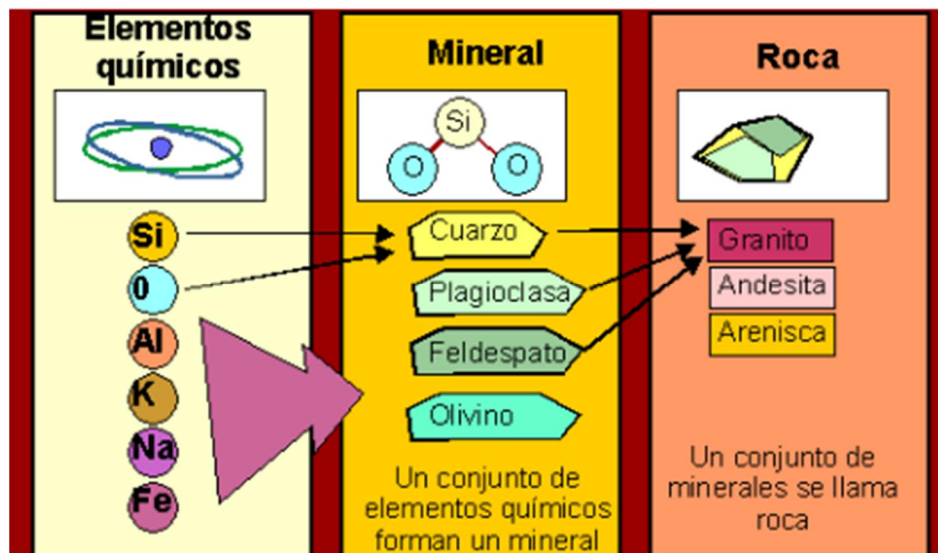


Imagen 4. Formación de minerales y rocas

Entre los 118 elementos químicos conocidos, solamente unos 20 son significativos y de estos solamente son los más abundantes, tal y como se observa en la siguiente tabla.

ELEMENTO	PORCENTAJE EN PESO EN LA CORTEZA TERRESTRE
I.- OXIGENO	46.46
2.-SILICIO	27.61
3.-ALUMINO	8.07
4.-HIERRO	5.06
5.-CALCIO	3.64
6.-SODIO	2.83
7.-POTASIO	2.58
8.-MAGNESIO	2.07
9.-TITANIO	.62
10.-HIDROGENO	.14
II.-LOS RESTANTES ELEMENTOS	.92

Tabla 1.Elementos en la corteza terrestre .Fuente: <http://www.lenntech.es/tabla-peiodica/abundancia.htm>



## 2.2. Propiedades de los Minerales

Las propiedades de los minerales nos permiten diferenciar minerales distintos. Identificar las propiedades de un mineral nos puede permitir reconocerlo, saber su composición y su utilidad sin necesidad de realizar análisis químicos.

Los minerales, como sustancias puras, presentan unas propiedades medibles y constantes. Algunas propiedades pueden variar entre diferentes muestras. Pero en muchas ocasiones un par de propiedades nos permiten identificar un mineral.

Para su estudio vamos a dividir las propiedades en:

- FÍSICAS
- MECÁNICAS
- ÓPTICAS
- QUÍMICAS

### PROPIEDADES FÍSICAS

Las propiedades físicas de los minerales son fundamentales para su identificación. Algunas de las más importantes pueden determinarse mediante simple inspección ocular o mediante ensayos muy sencillos. Todas las características de los minerales dependen de su composición química y estructura, en la que ejercen una gran influencia las contaminaciones, mezclas y defectos estructurales que posea cada ejemplar en concreto.

Las propiedades físicas más importantes son la densidad, las propiedades magnéticas, las propiedades eléctricas y la forma o hábito.

#### Densidad

La densidad es la relación entre la masa de un mineral y el volumen que ocupa. Se suele expresar en  $\text{g/cm}^3$ . Se consideran: ligeros con densidades inferiores a  $2,5 \text{ g/cm}^3$ , normales entre  $2,5$  y  $4 \text{ g/cm}^3$  y pesados los superiores a  $4 \text{ g/cm}^3$ . La densidad es un dato de gran fiabilidad para la determinación de los minerales.



Imagen 6. La Baritina es un mineral de alta densidad. 4,47 g/cm<sup>3</sup>.



Imagen 5. El yeso es un mineral de baja densidad. 2,31 g/cm<sup>3</sup>.

### Propiedades magnéticas

Es una propiedad relacionada con el contenido en hierro (Fe) de un mineral. Cuando los minerales son fuertemente atraídos por un imán se denominan ferromagnéticos como la magnetita. Algunos minerales son atraídos débilmente y se les denomina paramagnéticos como la hematites y la siderita. Cuando no son atraídos se denominan diamagnéticos como el azufre y el cuarzo.



Imagen 8. Magnetita. Mineral ferromagnético.



Imagen 7. Azufre. Mineral diamagnético.

### Propiedades eléctricas

La conductividad es la facilidad de un mineral para transmitir la corriente eléctrica. Los metales nativos, los sulfuros y los óxidos metálicos son buenos conductores para la mayoría de los minerales son malos conductores. Algunos cristales cuando se someten a variaciones térmicas se cargan de electricidad en algunas caras, el fenómeno se conoce como piroelectricidad (la turmalina). Algunos minerales al estar sometidos a presión adquieren cargas eléctricas de signo contrario en sus extremos. El fenómeno se conoce como piezoelectricidad. Así, el cuarzo es capaz de generar chispas cuando es golpeado.



*Imagen 9. Turmalina. Mineral piroeléctrico.*

### Forma o hábito

El hábito cristalino describe el aspecto y forma que presentan los minerales. El hábito se encuentra determinado por las condiciones ambientales de formación y es reflejo de la estructura cristalina. Un mismo mineral puede aparecer bajo hábitos diferentes.

### Tipos de hábito.

Geométricos: como cubos (pirita), bipiramides, romboedros.

Acicular: cristales delgados en forma de agujas, como en el yeso.

Tabular: cristales gruesos planos, similares a tablas, como en la barita.

Prismático o columnar: en forma de prisma, como en la turmalina.

Arborescente: similar a un árbol, como en la plata nativa.

Dendrítico: con forma de hojas de plantas, como en la pirolusita.

Fibroso: fibras paralelas que se pueden separar, como en el yeso.

Laminar: láminas que se pueden separar, como la mica.

Radial: cristales dispuestos en círculo como en la pirolusita.

## PROPIEDADES MECÁNICAS

### Dureza

Es la resistencia que ofrece la superficie de un mineral a ser rayada. Depende de la estructura (cuanto mayores sean las fuerzas de enlace, mayor será la dureza). Para cuantificar la dureza se utiliza la escala de Mohs que toma como referencia 10 minerales y sus durezas relativas.

ESCALA DE DUREZA DE MOHS									
									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Talco	Yeso	Calcita	Fluorita	Apatito	Ortoclasa	Cuarzo	Topacio	Corindón	Diamante
Se ralla con una uña		Se ralla con un cuchillo			Ralla al vidrio				

### Fractura

La rotura de un mineral a lo largo de una superficie irregular se denomina fractura.

Existen también diversos nombres para designar las diferentes clases de fractura: concoidea (en forma de conchas), fibrosa o astillosa. La fractura concoidea es típica del sílex, la variedad microcristalina del cuarzo.

### La exfoliación

Es la propiedad por la que un mineral se rompe a favor de alguna de sus caras planas, en láminas como las micas, romboedros en la calcita o cubos en la galena. Esta propiedad está íntimamente ligada a la estructura cristalina.

### Tenacidad

La tenacidad es la resistencia que opone un mineral a la rotura o deformación. No tiene ninguna relación con la dureza (el diamante es el mineral más duro que existe pero se puede romper con facilidad).

### Fragilidad

El mineral se rompe con facilidad y se hace trozos con poco esfuerzo. MALEABLE: el Mineral se lamina mediante golpes (oro).

### Ductilidad

El mineral puede estirar en forma de un hilo (oro).

### Flexibilidad

Cuando el mineral es doblado y no recupera su forma al cesar el esfuerzo.

### Elasticidad

Cuando el mineral es doblado, recupera su forma al cesar el esfuerzo (micas).

## PROPIEDADES QUIMICAS

Miden la capacidad de reaccionar con otras sustancias. Algunas propiedades químicas pueden ser percibidas por los sentidos como sabor (solubilidad) y olor (contenido en azufre).

### Reacción con ácidos

La calcita reacciona con el ácido clorhídrico y se descompone desprendiendo dióxido de carbono.

### Solubilidad

Formación de una disolución en agua, como el yeso. Algunos minerales solubles poseen sabor salado, como la halita y la silvina.



*Imagen 10.Silvina.*



## Radiactividad

Emisión de partículas atómicas, como la uraninita.

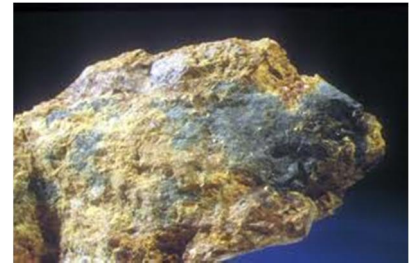


Imagen 11. Uraninita.

## PROPIEDADES ÓPTICAS

Son propiedades que se producen al incidir la luz sobre un mineral. Vamos a estudiar el brillo, la transparencia, el color, la luminiscencia, y la doble refracción.

### Brillo

Es una propiedad que describe el aspecto que presenta la superficie de mineral cuando refleja la luz. El brillo no tiene relación alguna con el color del mineral. El brillo de un mineral puede ser vítreo, metálico, adamantino y sedoso entre otros.

### Transparencia

Los minerales, según permitan el paso de la luz, se pueden clasificar como:

- Transparente: puede apreciarse con nitidez la forma de un objeto situado detrás.
- Translúcido: deja pasar luz pero no se aprecian las formas.
- Opacos: los cristales impiden totalmente el paso de la luz.



Imagen 14. TRANSPARENTE.  
Cuarzo.



Imagen 13. TRANSLÚCIDO.  
Yeso.



Imagen 12. OPACO. Pirita.

### Color

Es el color que presenta el mineral. Puede ser determinante en algunos minerales como la azurita (azul), olivino (verde oliva), azufre (amarillo), malaquita (verde)...

### Luminiscencia

Algunos minerales, como la fluorita, emiten luz al ser iluminados con luz ultravioleta.



*Imagen 15. Fluorita.*

### Doble refracción

Algunos minerales, como la calcita, desvían la luz formando una doble imagen.

### 2.3. Clasificación de los Minerales

Los minerales se clasifican atendiendo a su composición química. Ya vimos que la composición y la estructura determinaban muchas de las propiedades del mineral.

Aunque son muchos grupos, uno solo, los silicatos, constituye la mayor parte de las rocas terrestres.

Los minerales se clasifican por su composición química, recibiendo las clases en las que se ordenan el nombre del tipo de compuesto químico.

- Elementos nativos: formados por un solo elemento químico. Ejemplos son el oro, la plata, el platino, el azufre, el diamante y el grafito.
- Halogenuros: son sales como la halita, que es la sal que utilizamos en los alimentos. Otras sales son la silvina y la fluorita.
- Óxidos: se combinan metales con oxígeno. Ejemplos son la magnetita y hematites (óxidos de hierro), y corindón (de aluminio).
- Sulfuros: combinaciones de azufre y un metal. De este grupo son la pirita (de hierro), la galena (de plomo) o el cinabrio (de mercurio).
- Carbonatos: minerales como calcita y dolomita forman las rocas carbonatadas. Otro de interés es la siderita (mena de hierro).
- Sulfatos: el más abundante es el yeso. Otros sulfatos son la anhidrita y la baritina.
- Silicatos: son los minerales más abundantes. Destacan el cuarzo, los feldespatos, las micas (moscovita y biotita), el olivino y los granates.

Estos tres últimos grupos son los más importantes y los más tratados en el trabajo.

## 2.4. Uso de los Minerales

Los minerales son materias primas para el ser humano. Muchas de sus actividades dependen de los minerales. La minería es la técnica que se ha desarrollado para extraer minerales.

De los minerales y de las rocas obtenemos muchas de las materias primas que utiliza el hombre. Estos minerales útiles o minerales de interés económico los podemos clasificar como:

- Minerales metálicos: además de los elementos nativos, como el oro, la plata, el mercurio o el cobre son importantes como materia prima para la industria la siderita (hierro), la galena (plomo) y el cinabrio(mercurio).
- Minerales no metálicos: el azufre nativo, el grafito, el yeso (para la construcción), la halita o sal común (para los alimentos) y los fosfatos (agricultura)
- Minerales energéticos: la uraninita es la principal fuente de uranio para la producción de energía.
- Gemas: minerales que destacan por su belleza y dureza como el diamante, el berilo, el topacio, los granates, las ágatas, etc.

## 2.5. La minería



Para obtener los minerales el ser humano ha desarrollado una serie de técnicas que reciben el nombre de minería. Una mina es una obra que se hace para extraer minerales. Las minas pueden ser subterráneas o a cielo abierto.

La minería subterránea tiene un coste mayor (humano y económico) que la minería a cielo abierto. Las condiciones en el interior de la mina causan enfermedades pulmonares y los accidentes son frecuentes.

La minería subterránea en los países industrializados está muy mecanizada. La maquinaria extrae el mineral a la vez que entiba el techo de la mina.

Para subir el mineral y los mineros a la superficie, se utilizan elevadores que son izados (*castilletes*). En zonas mineras son elementos característicos del paisaje.



La minería a cielo abierto, es más segura para los mineros, puesto que requiere menos personal y permite una mayor mecanización.

Por contra, el área afectada por la explotación y el volumen de residuos son mucho mayores. Una de las minas más grandes de Galicia, es la antigua mina de lignito situada en As Pontes, en la actualidad reconvertida en un lago artificial.



*Imagen 17. Mina de Lignito en As Pontes, A Coruña.*



*Imagen 16. Imagen actual de la Mina de Lignito en As Pontes. A Coruña.*



### 3. ORIGEN Y FORMACIÓN DE LAS ROCAS

El conjunto de los distintos tipos de rocas, atendiendo a su origen y formación geológica, es decir genéticamente hablando, puede ser clasificado en tres tipos, según se trate de rocas originales procedentes del magma terrestre, o bien de rocas formadas por la erosión y meteorización de ellas o de cualquiera de los tipos transformados por el calor y la presión (Metamorfismo).

- Rocas Ígneas
- Rocas Sedimentarias
- Rocas Metamórficas.

Dentro de cada grupo existen clasificaciones más o menos generales atendiendo a su composición mineralógica y a otros factores. En este proyecto hemos elaborado una clasificación que se presenta en la siguiente tabla.

CLASE	TIPO	FAMILIA
ÍGNEAS	INTRUSIVAS (Granos gruesos)	Granito Sienita Diorita Gabro Peridotita Piroxenita
	EXTRUSIVAS (Grano fino)	Obsidiana Pómez Toba volcánica Riolita Traquita Andesita Basalto
SEDIMENTARIAS	CALCÁREAS	Caliza Dolomía
	SILÍCEAS	Pizarra Areniscas Ópalo Conglomerado Brecha
METAMÓRFICAS	FOLIADAS	Gneis Esquisto Anfibolita Pizarra
	NO FOLIADAS	Cuarcita Mármol Serpentinita

Tabla 2. Tabla Clasificación de las Rocas. Fuente: <http://edafologia.ugr.es/rocas/index.htm>

Uno de los puntos fundamentales a la hora de estudiar la petrogénesis es entender lo que se denomina el ciclo de las rocas.

Siendo este ciclo una serie de procesos geológicos por los cuales uno de los tres grande grupos de rocas se forma a partir de los otros dos. Este ciclo podría empezar con la generación de magma en el interior de la Tierra, donde las temperaturas y presiones son lo suficientemente altas como para fundir las rocas preexistentes. Esta actividad interna de la Tierra se conoce como el episodio plutónico, este significa que las rocas preexistentes son fundidas y los minerales destruidos, dando como resultado un líquido caliente denominado magma. Este, al ser de menor densidad tenderá a ascender, enfriarse y cristalizar, formando una roca ígnea plutónica.

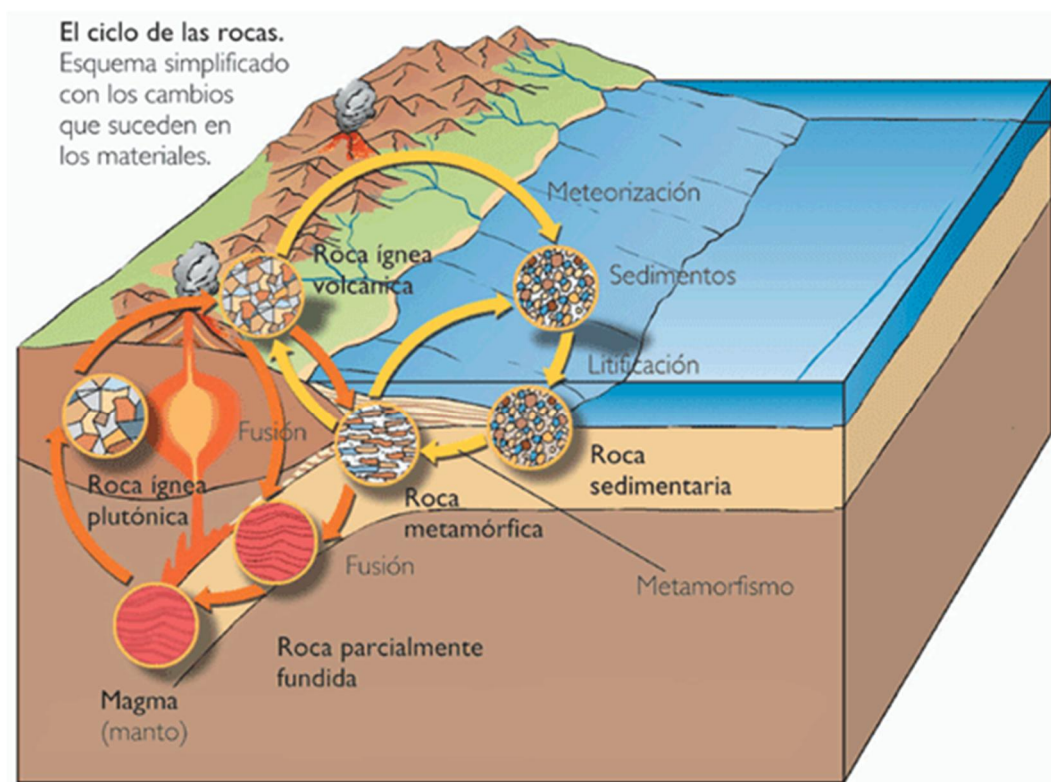


Imagen 18.El ciclo de las rocas. Fuente: <http://larafranciscobio1.blogspot.com.es/2011/10/el-ciclo-de-las-rocas.html>

Como ya sabemos, el magma se forma allí donde las placas colisionan o se separan. En los límites de convergencia o de colisión de placas, las rocas ígneas junto con las metamórficas y las sedimentarias son finalmente elevadas para formar las cadenas montañosas.

Los geólogos denominan a estos procesos como una Orogenia; esto es un conjunto de procesos geológicos acotados en el tiempo que dan como resultado la generación de montañas.

Durante el proceso de alzamiento, las rocas de la corteza que cubren a las rocas ígneas infrayacentes son erosionadas gradualmente por la acción de los agentes



externos, generado material suelto que será acarreado hacia las zonas bajas y exponiendo en superficie a las rocas ígneas formadas en las partes más profundas. Estas, al estar ahora en un ambiente mucho más frío y húmedo que el de su lugar de nacimiento, se encuentran en desequilibrio y sus minerales comenzarán a sufrir cambios químicos, como por ejemplo los minerales con hierro, se oxidan dando lugar a la formación de óxidos férricos, o como los feldespatos, que se transforman en minerales arcillosos, con aumento del volumen y rotura del agregado mineral.

Todo esto conduce a la formación de material suelto (regolito) y liberación de sustancias químicas que pasarán a estar disueltas y a ser transportadas por el agua de los ríos o de los glaciares de montañas hacia los sectores topográficamente más bajos (cuencas), que en muchos casos son los fondos oceánicos y reciben todo este material, depositándose para formar capas horizontales de sedimentos. Como los procesos geológicos son continuos una roca puede transferirse a otro tipo de roca, a causa de cambios físicos y/o químicos como la meteorización / erosión que puede afectar una roca ígnea para formar un sedimento. Alternativamente un tipo de roca puede generarse por procesos geológicos diferentes.

La sedimentación suele ir acompañada de hundimiento del fondo, por lo tanto los sedimentos irán siendo enterrados a medida que nuevas capas se vayan depositando por encima de ellos. Esto conducirá a una litificación<sup>3</sup> progresiva por compactación, expulsión del agua de los poros y aumento de la densidad. A mayor profundización habrá una mayor litificación y como la temperatura y la presión aumentan con la profundidad, los sedimentos estarán sometidos cada vez a mayor temperatura y presión. A unos 10 km las temperaturas serán de unos 300 °C y las presiones de unos 3 kb, aquí los minerales de las rocas sedimentarias como las arcillas empezarán a cambiar para convertirse en minerales estables a estas nuevas condiciones físicas y así, sin dejar el estado sólido, un mineral se transforma en otro (se metamorfiza) y se genera una roca metamórfica. Si este proceso de profundización continúa y la temperatura de la roca se eleva lo suficiente, terminará por fundirse y generar un nuevo magma, el que al ascender cristalizará y formará una nueva roca ígnea, cerrando el ciclo.

Aunque cabe decir que que una roca en particular no tiene por qué recorrer inevitablemente este ciclo. No es necesario de que toda roca ígnea sea levantada de su lugar de formación y expuesta en superficie para que los agentes erosivos la ataquen y degraden, puede que una roca ígnea nunca sea expuesta en superficie, todo depende de la evolución geológica de la región.

El ciclo de las rocas nunca se acaba, está siempre operando de forma lenta y continua y en diferentes partes del mundo. Es aquí donde mejor se materializan los conceptos de gradualismo - actualismo de los fenómenos geológicos. Las rocas que alcanzaron la superficie son recicladas continuamente pero nosotros

---

<sup>3</sup> Proceso mediante el cual un material se convierte en roca compacta.

solo podemos ver la parte superior del ciclo y debemos deducir los de la parte profunda a partir de evidencias indirectas.

En resumen el ciclo de las rocas es, Plutonismo, vulcanismo, alzamiento tectónico, metamorfismo, meteorización, transporte, depositación y enterramiento son los procesos geológicos que combinados en el ciclo de las rocas hace que un tipo de roca se convierta en alguno de los otros dos. Sin embargo, estos procesos son a su vez orquestados por la tectónica de placas.

El plutonismo y el vulcanismo son el resultado de calor interno de la tierra y tienen lugar en tres ambientes geotectónicos bien definidos:

- 1- En los límites convergentes (Imagen 19): donde una placa oceánica desciende llegando hasta el manto donde se funde, formando magma y rocas ígneas. Este fenómeno se conoce como la subducción<sup>4</sup>.

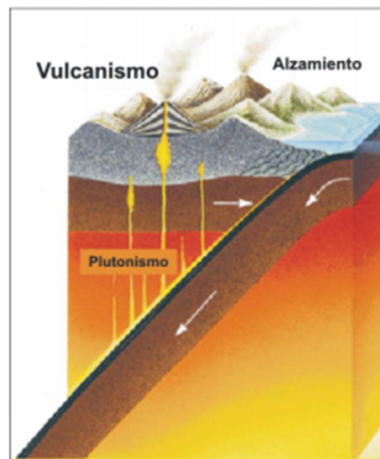


Imagen 19. Límite convergente. Placa oceánica que desciende y se funde.

- 2- En los límites divergentes (Imagen 20) como en las dorsales centro oceánicas, donde el fondo oceánico se expande permitiendo el ascenso del magma basáltico proveniente del manto.

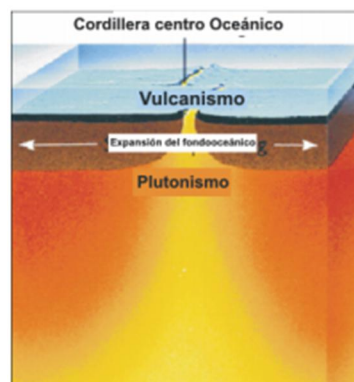
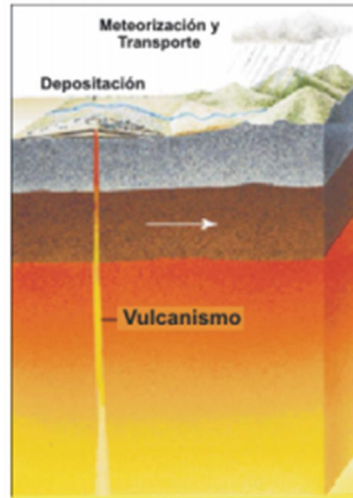


Imagen 20. Límite divergente. El magma asciende y el fondo oceánico se expande.

<sup>4</sup> La subducción de placas es el proceso de hundimiento de una placa litosférica bajo otra en un límite convergente. Fuente: Plate tectonics, Encyclopedia of Earth.

- 3- En las denominadas puntos calientes (Figura 16d), que son lugares donde el magma asciende desde el manto y sale a la superficie para formar volcanes.



*Imagen 21. Interior de continente, el denominado punto caliente.*

Todo esto significa que las rocas ígneas son en general el producto de la interacción de las placas y de la actividad del calor interno de nuestro planeta. Si no hay diferencia de calor entre núcleo y corteza, no hay movimiento de las corrientes de convección y por lo tanto no hay movimiento de las placas litosféricas, y si las placas no se mueven no hay formación de magma, ni volcanes ni rocas ígneas.

A continuación estudiaremos la formación de todos y cada uno de los 3 grupos de rocas.

### 3.1. Rocas Ígneas

Las rocas ígneas se forman por la cristalización de un magma, una masa viscosa de silicatos fundidos que se originan en el interior de la corteza terrestre o en el manto superior, allí donde la temperatura asciende hasta los 700 °C o más, que son las temperaturas necesarias para fundir a la mayoría de las rocas. Cuando el magma se enfría en el interior de la corteza, la pérdida de calor es muy lenta y por lo tanto los cristales que se forman a partir de éste tendrán suficiente tiempo como para crecer y formar una roca ígnea de grano grueso. Sin embargo si el magma es expelido bruscamente hacia la superficie como lo hace un volcán, su enfriamiento y solidificación es muy rápido, y por lo tanto los cristales no tienen tiempo para un crecimiento gradual. En estas circunstancias, se formarán una gran cantidad de pequeños cristales y el resultado final será una roca de grano muy fino. A partir de esto podemos decir que, en base al tamaño de los cristales, los geólogos distinguen dos grandes subgrupos de rocas ígneas: las intrusivas, enfriadas en el interior de la corteza, y las extrusivas, enfriadas en la superficie.

Las rocas ígneas están formadas por cristales, es decir minerales generados por un proceso de cristalización. Eventualmente pueden tener material vítreo, sustancia silicatada no ordenada en un sistema cristalino específico.

#### ROCAS ÍGNEAS INTRUSIVAS

Son las formadas por la cristalización lenta de un magma, que desde la zona de generación se movilizó y se alojó en otra roca sólida en la profundidad de la corteza. Ellas pueden ser reconocidas fácilmente por sus agregados de grandes cristales (la mayoría reconocibles a simple vista) los cuales crecieron lentamente a medida que el magma se enfriaba gradualmente.

Como se dijo anteriormente, el enfriamiento lento de magma en el interior de la corteza, es debido a que las rocas de caja (rocas que contienen al magma), son por lo general muy malas conductoras del calor, y por lo tanto este se disipa lentamente. El Granito es una roca ígnea intrusiva por excelencia.

#### ROCAS ÍGNEAS EXTRUSIVAS

A diferencia de las anteriores, las rocas tales como el basalto se forman a partir de un enfriamiento muy rápido como el que tiene lugar en una erupción volcánica, donde el magma es lanzado hacia la superficie. Allí, el contraste térmico es muy alto y la disipación del calor es muy rápida, dando una roca muy compacta y con cristales muy pequeños rodeados de material vítreo, o solo vidrio. Estas rocas ígneas extrusivas, son fácilmente reconocidas por la presencia del vidrio volcánico, por su textura muy fina o por presentar

agujeros (vesículas) como si fuera un queso gruyere, producto del escape de gases durante el enfriamiento.

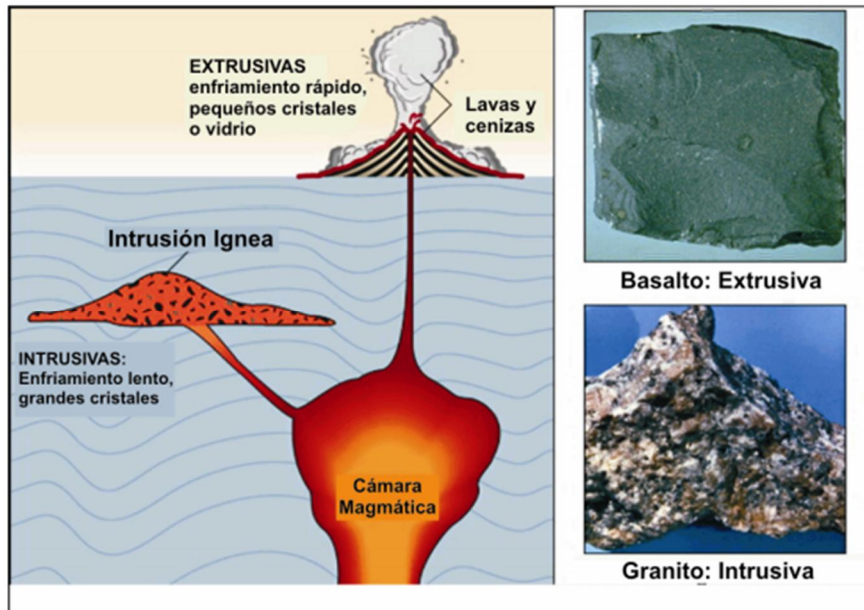


Imagen 22. Rocas ígneas intrusivas y extrusivas

### MINERALES COMUNES EN ROCAS ÍGNEAS

La mayoría de los minerales de las rocas ígneas son silicatos. Por una parte, es debido a que la sílice es un componente abundante en la Tierra, y por otro, es porque los minerales silicatados se funden a temperaturas y presiones propias de la corteza y manto superior. Los silicatos más comunes de las rocas ígneas son el cuarzo, los feldespatos, las micas, piroxenos, anfíboles y olivinos.

### CLASIFICACIÓN DE LAS ROCAS ÍGNEAS

Para clasificar una roca ígnea debemos conocer su composición mineralógica y la cantidad de cada uno de los minerales esenciales (composición modal), además de su textura, la cual nos dará información sobre la forma en que se enfrió el magma. Con toda esta información es posible darle un nombre específico a cada roca ígnea.

Una roca ígnea nos da información sobre qué tipo de material es el que se fundió, y en qué condiciones térmicas se realizó la fusión. Las rocas ígneas son muy buenos indicadores de las condiciones geotectónicas de una región, ya que el tipo de roca ígnea está íntimamente relacionado con el tipo de interacción entre las placas tectónicas. En la Cordillera de los Andes, la roca volcánica típica es la andesita, que es a su vez la roca característica de las zonas de subducción entre una corteza continental y otra oceánica.



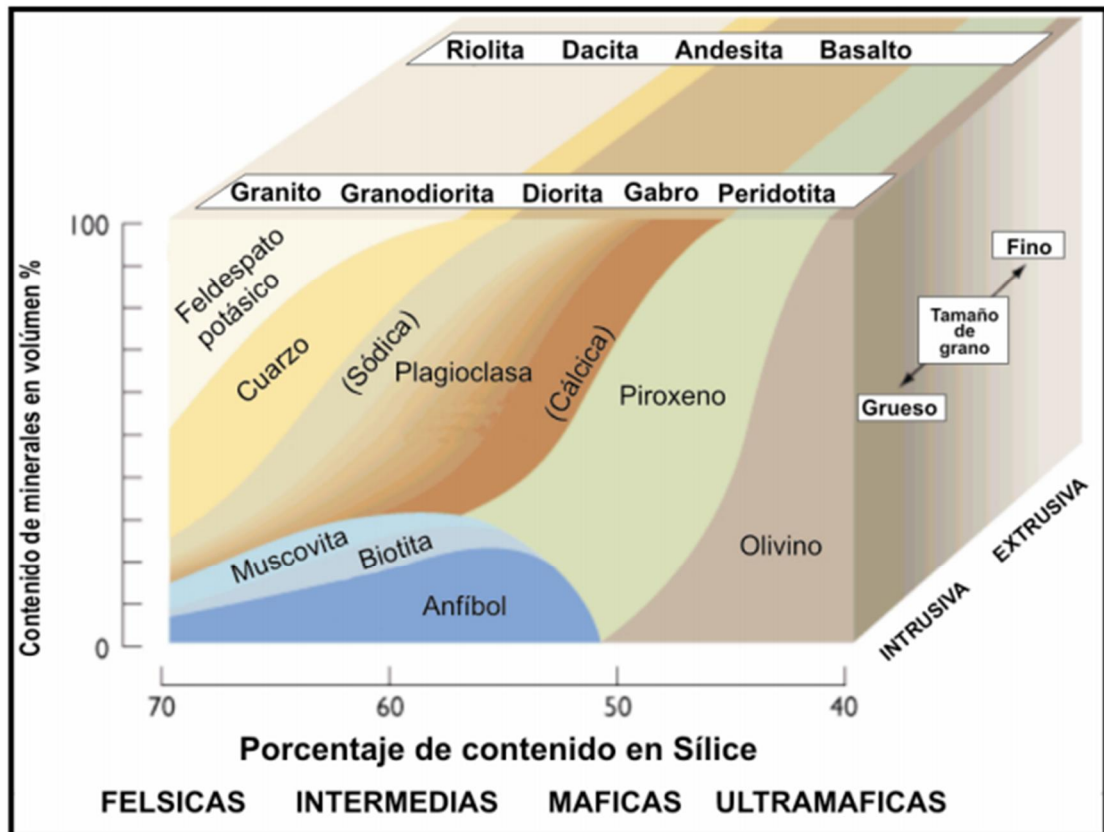


Imagen 23. Esquema de clasificación de rocas ígneas. FUENTE. Cátedra de Geología General, Universidad de Córdoba.

### 3.2. Rocas sedimentarias

El sedimento es el precursor de una roca sedimentaria, y se encuentra en la superficie de la Tierra como capas de partículas sueltas tal como la arena, el limo o la arcilla. Algunas partículas, como los granos de arena y limo, provienen de la destrucción de otras rocas en la superficie terrestre por un proceso denominado meteorización. Esto es, las rocas son fragmentadas y disgregadas en trozos de varios tamaños. Estos fragmentos son luego transportados por algún agente de transporte y erosión (agua, viento o hielo) y depositados en los sectores topográficamente bajos, formando capas sucesivas (Imagen 24)

La meteorización y la erosión producen dos tipos de sedimentos:

-Sedimentos Clásticos: son las partículas depositadas físicamente, tales como granos de cuarzo y feldespatos provenientes de la fragmentación y alteración de otra roca, como podría ser un granito (*la palabra clasto, del griego Klastos, significa romper*).



-Sedimentos químicos o bioquímicos: son sustancias nuevas que se forman por precipitación química de algunos componentes de las rocas originales que fueron disueltos durante el proceso de meteorización, y son llevados por el agua de los ríos hasta el mar o un lago. Estos sedimentos incluyen capas de minerales tales como halita (sal de cloruro de sodio) y calcita (carbonato de calcio). En estos procesos suelen intervenir organismos vivos que asimilan ciertas sustancias, y que al morir dejan sus restos en el lugar donde vivieron, y pasan a formar parte del sedimento.

Las rocas sedimentarias están compuestas de clastos (fragmentos de minerales y rocas), matriz (parte fina que rodea y sostiene a los clastos, puede o no existir) y cemento (material de origen químico que aglutina a los clastos, puede o no existir).

### DESDE EL SEDIMENTO A LA ROCA SÓLIDA

Litificación: es el proceso que convierte a un sedimento (material suelto) en roca sólida, y puede ocurrir de dos formas:

- Por compactación, cuando los granos son apretados unos contra otros por el efecto del peso de los sedimentos suprayacentes, produciendo un material más denso y compacto que el sedimento original.
- Por cementación, cuando una sustancia aglutinante (cemento) se deposita entre los granos de un sedimento y los une entre sí. Estas sustancias pueden ser de varios tipos, y los más comunes son el  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , carbonatos o sílice.

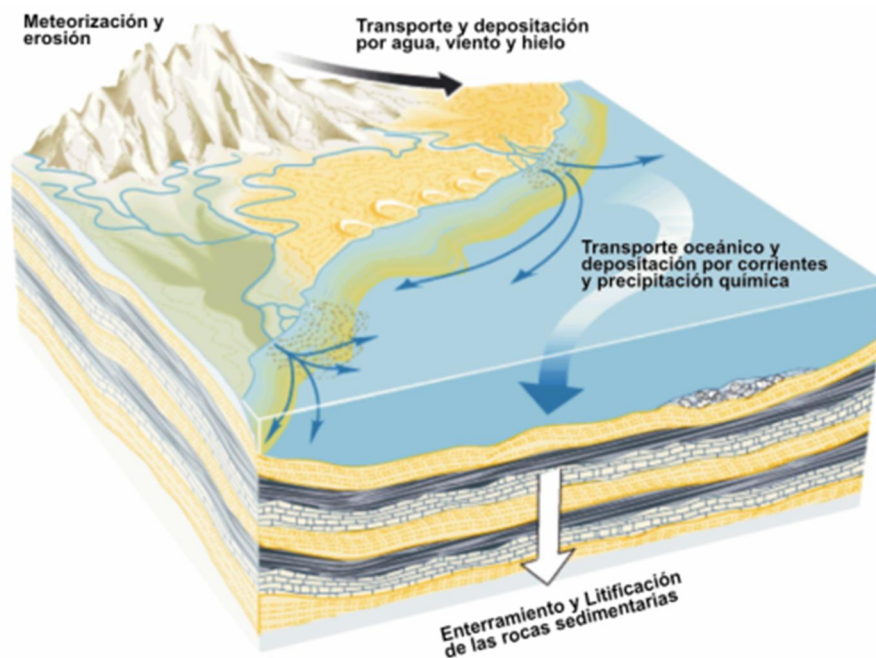


Imagen 24. Proceso de formación de rocas sedimentarias. Fuente: [http://www.ugr.es/~agcasco/msecgeol/secciones/petro/pet\\_sed.htm](http://www.ugr.es/~agcasco/msecgeol/secciones/petro/pet_sed.htm)

Los sedimentos son compactados y cementados después de que son enterrados y cubiertos por las capas de otros sedimentos. Así, una arenisca se forma por la litificación de granos de arena, y una caliza es la litificación de pequeños caparzones de fósiles marinos y otras partículas de carbonato de calcio.

Tanto los sedimentos como las rocas sedimentarias, están caracterizados por la alternancia de capas de diferentes colores. Cada una de estas capas suele ser un estrato, y reflejan cambios en la mineralogía y el tamaño de grano (por ejemplo capas de areniscas intercaladas con limolitas), o diferencias en las texturas, como cuando una arenisca de grano grueso se intercala con una de grano fino.

Debido a que las rocas sedimentarias se forman sobre la superficie terrestre, éstas cubren una buena parte de su superficie y de los fondos oceánicos. Sin embargo, solo representan una capa muy delgada, comparadas con las rocas ígneas y metamórficas que ocupan el mayor volumen de la corteza.

### MINERALES COMUNES EN ROCAS SEDIMENTARIAS

Los minerales de origen clástico más comunes en los sedimentos son también los silicatos.

Esto no es más que un reflejo de la abundancia de estos minerales en las rocas originales, las cuales aportan sus fragmentos (clastos) para formar las rocas sedimentarias. El cuarzo, los feldespatos y las arcillas son los más comunes.

Los minerales formados por precipitación química o bioquímica en los sedimentos son los carbonatos (calcita y dolomita), sulfatos (yeso y anhidrita) y cloruros (halita). Los primeros son frecuentes en depósitos marinos, y los segundos en lagos que han sufrido una evaporación total.

### CLASIFICACIÓN DE ROCAS SEDIMENTARIAS

Para clasificar una roca sedimentaria clástica, es necesario definir el patrón textural. Los elementos que definen el patrón textural de las rocas detríticas son el tamaño de grano, la selección, la morfología de los clastos y el empaquetamiento. De esta forma, se puede encuadrar a una determinada roca sedimentaria clástica en algunos de los cuatro subgrupos (conglomerados, areniscas, limolitas o arcilitas, imagen 25).

Principales clases de Sedimentos y Rocas sedimentarias		
Tamaño de partícula	Sedimento	Roca
Grueso Mayor de 256 mm 256 - 64 mm 64 - 2 mm	Bloques Cantos Guijarros	Conglomerados
Medio 2 - 0.062 mm	Arena	Areniscas
Fino 0.062 - 0.0039 mm	Limo	Limolita
Mas fino que 0.0039 mm	Arcilla	Lutitas

Imagen 25. Principales clases de Sedimentos y Rocas sedimentarias.

La clasificación o selección de tamaños, es la medida de la distribución de tamaños de un sedimento (frecuencia vs clases de tamaño). Una roca con una gran dispersión de tamaños de grano se dice que posee una pobre selección, mientras que una roca bien seleccionada muestra, por tanto, escasa variación en el tamaño de grano. La clasificación es indicativa de la historia del transporte del sedimento.

La morfología de clastos, se refiere a que se pueden medir varios parámetros como la esfericidad, el aplanamiento, etc. El grado de redondez es el dato morfológico de mayor interés ya que es un dato indicativo de la historia del sedimento. Se distinguen clastos muy redondeados, redondeados, semiredondeados, semiangulosos, angulosos y muy angulosos (imagen 26).

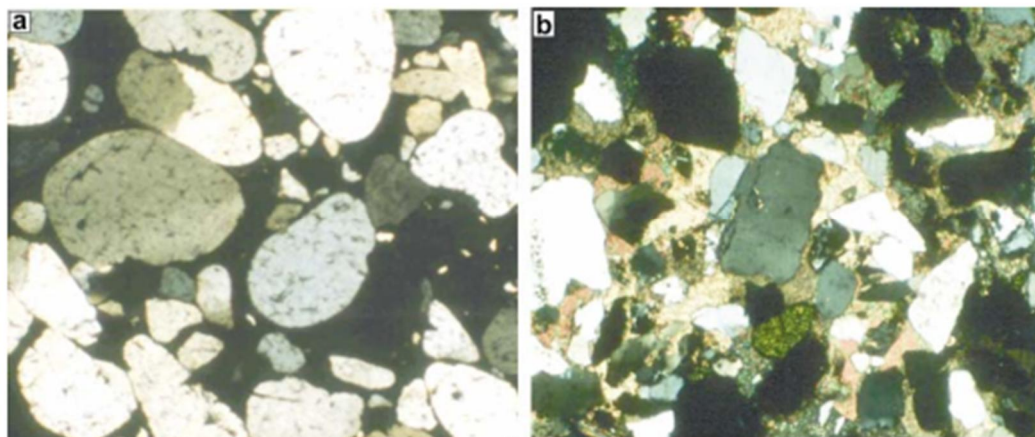
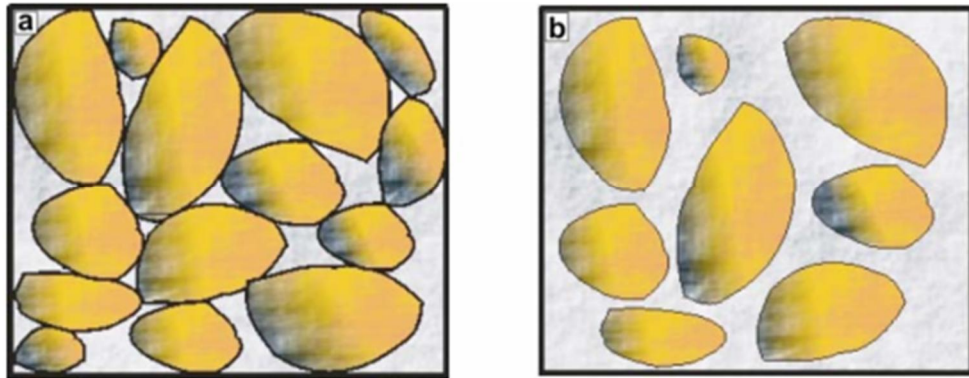


Imagen 26. a) Clastos redondeados. Fotomicrografía de una arenisca con clastos con morfología redondeada. B) Clastos angulosos. Fotomicrografía de una arenisca con clastos.

El empaquetamiento, es el espacio entre los clastos que puede estar ocupado por un cemento (calcáreo, silíceo, ferruginoso o salino), o por material detrítico menor de 30 micras (matriz). El empaquetamiento puede caracterizarse en función del porcentaje de matriz frente al de clastos, observando si la roca presenta una textura grano-sostenida o matriz-sostenida. El empaquetamiento, entre otros factores, es indicativo de la densidad del medio de transporte del sedimento (imagen 27).



*Imagen 27.a) Textura con empaquetamiento grano-sostenido, b) textura con empaquetamiento matriz-sostenido.*

Para el caso de los sedimentos químicos o bioquímicos, la clasificación se basa en su composición química, que para los sedimentos marinos refleja los principales elementos químicos disueltos en el agua del mar (imagen 28).

Las rocas sedimentarias son las que contienen los fósiles, y por lo tanto la información guardada en éstas nos permite descifrar la historia de la vida en nuestro planeta. Además, como la formación de una roca sedimentaria depende del ambiente externo, son buenos indicadores de las condiciones paleoambientales y paleoclimáticas. A partir de las rocas sedimentarias podemos deducir como era el clima en una determinada época, y si hubo un río, un lago, un delta o un océano.

Existen dos grupos principales: las rocas carbonáticas y las evaporitas. Además, hay que indicar que algunos tipos de rocas carbonatadas pertenecen a las rocas orgánicas (p. ej. Las biohermitas, biolitas, etc.).

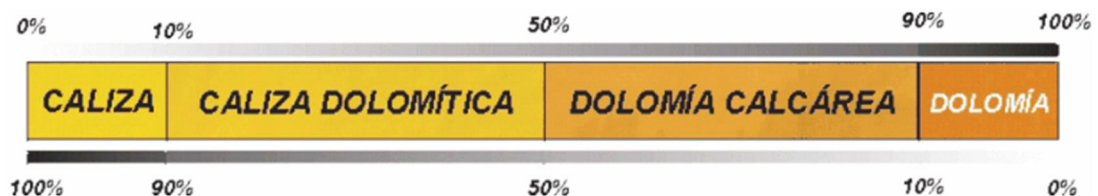
Clasificación de sedimentos químicos y bioquímicos		
Sedimento	Roca	Composición química
<b>BIOQUÍMICOS</b>		
Arenas y Fangos (bioclastos)	Caliza	Carbonato de Calcio ( $\text{CaCO}_3$ )
Sedimentos Silíceos	Chert	Sílice ( $\text{SiO}_2$ )
Materia Orgánica	Orgánica	Compuestos Carbónicos
<b>QUÍMICOS</b>		
Sedimentos no primarios	Dolomitas	Carbonato de Calcio y Magnesio $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$
Oxidos de Fe	Formación Ferrífera	$\text{Fe}_2\text{O}_3$
Evaporítico	Evaporitas	Sulfatos y cloruros $\text{NaCl}$ ; $\text{CaSO}_4$
Sedimentos no primarios	Fosforitas	Fosfatos de calcio $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$

Imagen 28. Clasificación de sedimentos químicos y bioquímicos. Fuente: [http://www.ugr.es/~agcasco/msecgeol/secciones/petro/pet\\_sed.htm](http://www.ugr.es/~agcasco/msecgeol/secciones/petro/pet_sed.htm)

### Rocas evaporíticas

Son las rocas formadas a partir de la intensa acumulación de sales (sulfatos, carbonatos, cloruros, bromuros), que puede tener lugar en aguas continentales o marinas sometidas a una intensa evaporación. Estas rocas se forman por precipitación química directa de sales en un fluido acuoso sobresaturado. Las principales rocas evaporíticas están compuestas por la acumulación de alguno/s de los siguientes minerales: yeso ( $\text{SO}_4 \text{ Ca} + 2\text{H}_2\text{O}$ ), silvina (ClK), halita (ClNa), thenardita ( $\text{SO}_4\text{Na}_2$ ), carnalita ( $\text{ClK} \cdot \text{Cl}_2\text{Mg} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ), etc.

Estas rocas suelen presentar texturas equigranulares (como las rocas plutónicas), y se reconocen fácilmente por ser solubles o por su baja dureza.





### Rocas carbonatadas

Son rocas que están mayoritariamente compuestas por carbonatos; o bien calcita ( $\text{CO}_3\text{Ca}$ ), y entonces se denominan Calizas, o bien por dolomita ( $\text{CaMg}(\text{CaCO}_3)_2$ ) y entonces se denominan Dolomías. En función del porcentaje de calcita y dolomía que presenta la roca reciben diferentes nombres. De esta forma, podemos clasificarlos en: calizas, calizas dolomíticas, dolomías calcáreas y dolomías.

También es posible encontrar junto con los carbonatos clastos detríticos, en ese caso se habla de calcarenitas y calcilitas (calizas litográficas), en función del tamaño de grano de los clastos. Dentro de este grupo se englobarían también las margas. Existen otros tipos de rocas carbonatadas como los travertinos, formadas por precipitación directa de carbonato cálcico relacionadas a procesos hidrotermales.

### Rocas orgánicas

Son rocas formadas por la acumulación de materiales generados mediante procesos orgánicos. Por ejemplo, acumulación de conchas, exoesqueletos, restos vegetales, etc. Dentro de este grupo incluimos los carbones y algunos tipos de rocas carbonatadas y síliceas.

- Carbones

Los carbones son las rocas organógenas más típicas. Estas rocas se forman a partir de materia orgánica (fundamentalmente vegetal) transformada por un proceso denominado carbonización. Este proceso va transformando la materia orgánica, dando lugar a una serie de acumulados cada vez más ricos en carbono: turba, lignito, hulla y antracita.



*Imagen 31. Lignito*



*Imagen 30. Antracita.*



*Imagen 29. Hulla.*



- Calizas

Existen una serie de rocas carbonatadas formadas por la acumulación directa de material orgánico carbonático, generalmente conchas y exoesqueletos. Estos depósitos se encuentran en ocasiones en el registro geológico conservando su estructura biológica original (p.ej. arrecifes). Podemos distinguir los siguientes tipos:



*Imagen 32. Caliza Coralina. Contienen restos de esqueletos de corales, briozoos, bivalvos, moluscos, etc.*



*Imagen 33. Lumaquelas. Acumulación de restos de conchas cementadas.*



*Imagen 36. Calizas Algales*



*Imagen 34. Calizas Pelágicas. Acumulación de esqueletos de foraminíferos y flagelados.*



*Imagen 35. Tobas. Precipitados de carbonato sobre tallos de plantas.*

### Rocas silíceas

Algunos tipos de rocas silíceas formadas por la acumulación directa de material orgánico silíceo, generalmente caparazones de diatomeas (diatomitas), restos de radiolarios (radiolaritas) y acumulaciones de espículas de esponjas (espongiolitas).

### 3.3. Rocas metamórficas

Las rocas metamórficas son llamadas así porque en realidad, son la transformación de una roca preexistente (*meta = cambio, morfos = forma*). Estas rocas son generadas cuando las altas temperaturas y presiones en las profundidades de la Tierra, causan algún cambio en una roca ígnea, sedimentaria o metamórfica previa. Lo que cambia es la mineralogía, la textura y eventualmente la composición química sin perder su estado sólido; por eso se dice que los minerales de las rocas metamórficas no cristalizan, si no que crecen lentamente en estado sólido. A este proceso se lo denomina blástesis, y por lo tanto las rocas metamórficas están compuestas de blastos de diferentes minerales. Las temperaturas requeridas para metamorfizar una roca van de 200 a 700 °C; por encima de esta temperatura, las rocas se funden y dan lugar a rocas ígneas. En realidad, existe un paso intermedio donde se observan rocas de mezclas, parte ígnea y parte metamórfica, que se denominan rocas magmáticas.

El límite inferior de este proceso está considerado cuando los restos vegetales que puedan existir en las rocas sedimentarias alcanzan el grado de carbonización correspondiente a la hulla, coincidiendo además con la llamada *línea muerta* que corresponde a la desaparición del petróleo. También se considera como límite inferior cuando aparecen uno o más minerales metamórficos. El límite superior lo marca la fusión parcial de la roca, con la consecuente aparición de alguna fase fundida.

Una fase mineral se encuentra en estado de equilibrio cuando encuentra la cantidad mínima de energía interna. Cualquier cambio en las condiciones de equilibrio de esta fase coaccionará otra nueva que alcance sus propias condiciones de energía mínima.

#### FACTORES DEL METAMORFISMO

**Temperatura:** Está directamente relacionada con el gradiente geotérmico. Este varía entre 6°/km (fosas oceánicas) y 90°/km (puntos calientes), siendo el promedio del gradiente alrededor de los 30 °/km (imagen 37).

**Presión:** La presión estática está referida únicamente a la presión de confinamiento, que es la presión litostática + la presión de fluidos. Además de estas presiones, también influye en el proceso metamórfico la presión dirigida, la cual es originada por los procesos tectónicos.

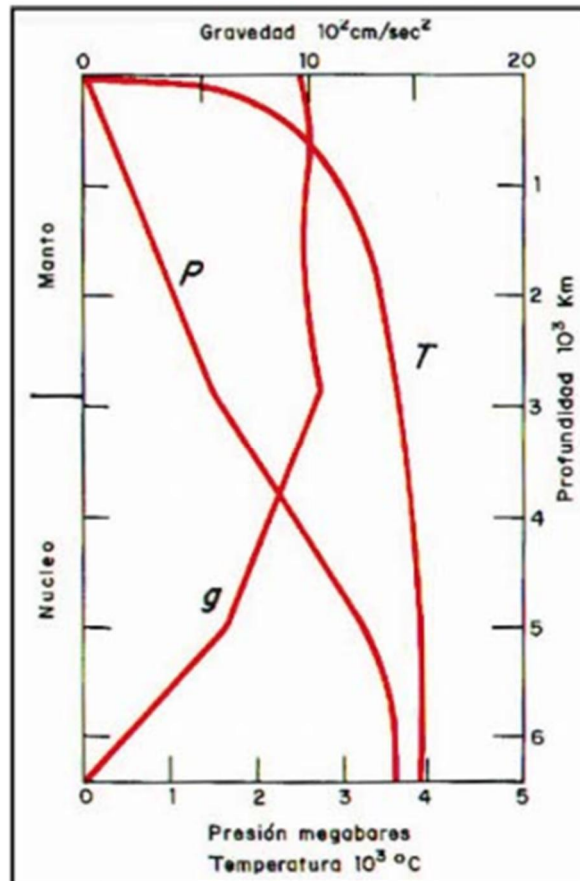


Tabla 3. Curvas de variación aproximada de la presión, la temperatura y la gravedad con la profundidad. FUENTE: Guía de trabajos prácticos. Cátedra de Geología General, Universidad de Córdoba.

En la corteza continental, que tiene densidades promedios de 2.7 a 2.8, 1 kbar equivale aproximadamente a 3 km de profundidad.

La presión y la temperatura van a influir directamente sobre los minerales involucrados en las reacciones metamórficas, por lo tanto existen ciertos minerales característicos bajo ciertos rangos de  $P$  y  $T$  que se denominan geotermómetros y geobarómetros.

### INTENSIDAD DEL METAMORFISMO

La intensidad del metamorfismo está relacionada directamente con la aparición y desaparición de ciertos minerales o asociaciones minerales. Dicha intensidad se la puede dividir en zonas metamórficas, aunque esta clasificación está casi en desuso. Dichas zonas son:

- Epizona –  $200^\circ$  a  $450^\circ$
- Mesozona –  $450^\circ$  a  $650^\circ$
- Catazona –  $650^\circ$  hasta el límite de fusión

Actualmente se utiliza la denominación de grado metamórfico, el cual se divide en:

- Muy bajo
- Bajo
- Medio
- Alto

La facies metamórfica es un conjunto de rocas recrystalizadas bajo el mismo rango de presión y temperatura.

### AMBIENTE METAMÓRFICO Y TIPOS DE METAMORFISMO:

#### Metamorfismo Regional y de Contacto

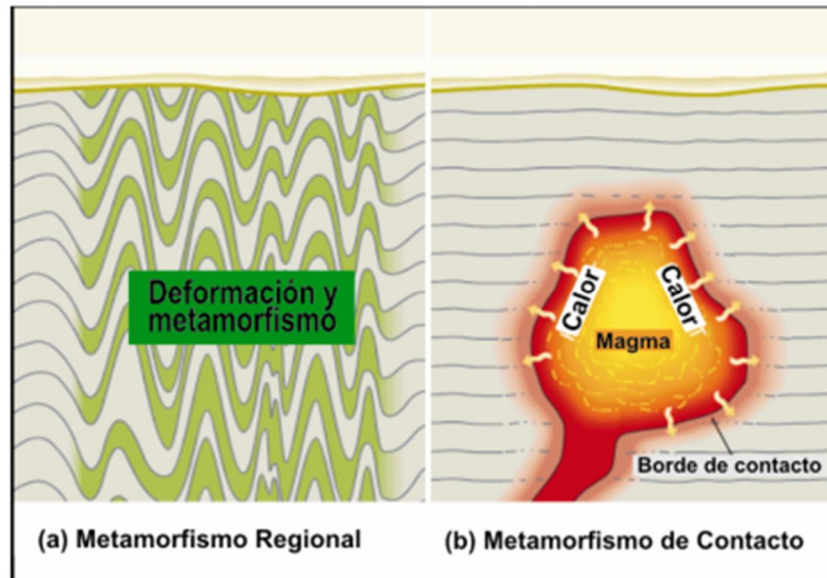
Los procesos que producen rocas metamórficas pueden tener lugar sobre un área muy amplia de la corteza o sobre un sector limitado. Cuando las altas temperaturas y presiones se extienden sobre una región muy amplia, se dice que las rocas han sido afectadas por un metamorfismo regional o dinamotérmico. Este tipo de metamorfismo se produce siempre en zonas de subducción o en zonas de colisión continental. Es el más difundido de todos debido a que siempre abarca grandes áreas dando lugar a un gran número de rocas tales como las pizarras, esquistos, gneises, etc. En las zonas de subducción se producen dos bandas que se denominan cinturones dobles de metamorfismo, y que se caracterizan uno por ser de alta presión y baja temperatura, y está ubicado siempre junto a la fosa oceánica, dando como resultado las facies de zeolitas, prehnita y esquistos azules, mientras que el otro es de baja presión y temperatura media o elevada y se forma hacia la zona interna del orógeno, siendo siempre de mucha mayor extensión que el primero, y las facies más comunes aquí son los esquistos verdes, anfíbolitas y granulitas.

En las zonas de colisión continental abarcan mayores áreas debido a que el proceso metamórfico puede afectar a ambos continentes. Las facies y rocas resultantes pueden ser las mismas que se encuentran en los cinturones dobles, pero tienen la influencia de los efectos tectónicos por lo que se forman rocas con mayor complejidad principalmente estructural. Esta deformación puede afectar a las rocas antes, durante o posteriormente al clímax metamórfico, por lo que a este proceso se lo denomina precinemático, sincinemático o postcinemático respectivamente.

Cuando la elevación de la temperatura es local y restringida a una pequeña área, tal como ocurre en las proximidades de una intrusión de roca ígnea, se



dice que el metamorfismo es de contacto o térmico (imagen 37). Aquí predomina la recristalización mineral sobre la deformación, la cual está casi ausente en la mayoría de los casos. Se produce siempre debido a la intrusión de cuerpos ígneos que sean capaces de producir la recristalización de su encajante. Sobre este último se forman aureolas metamórficas, que se caracterizan por la aparición o desaparición de uno u otro mineral índice (sillimanita, andalucita, biotita y clorita).



*Imagen 37. Dos tipos principales de metamorfismos. El regional abarca grandes sectores de la corteza, en cambio el de contacto se localiza en los bordes de las intrusiones magmáticas.*

Muchas de las rocas metamórficas producidas por un metamorfismo regional (tal como los esquistos) presentan una foliación característica, es decir una debilidad planar por la cual se romperá en forma de lájas paralelas. Esta foliación es el resultado de la deformación sufrida por la roca cuando fueron presionadas y plegadas. En cambio, las rocas del metamorfismo de contacto, se caracterizan por la ausencia de esta foliación y están formadas por un agregado de pequeños cristales de igual tamaño lo que las hace muy resistente a la rotura.

#### Metamorfismo de enterramiento

Se produce en las cuencas donde la subsidencia permite la acumulación de sedimentos de 10 a 12 km, resultando un metamorfismo de grado muy bajo en facies de zeolitas, con presiones de 3 kb y T de 300°.



### Metamorfismo dinámico

Se produce como resultado de la deformación intensa que tiene lugar en las zonas de falla, y puede llevar a la recrystalización de ciertos minerales de bajo grado.

### Metasomatismo

Se produce por la influencia de un material a mayor temperatura con la presencia de fluidos que aportan nuevos elementos químicos a las rocas afectadas, por lo que este metamorfismo es de carácter aloquímico. Las rocas resultantes se denominan skarns, y principalmente están formadas por silicatos de calcio. Estas rocas generalmente están ligadas a la génesis de yacimientos minerales.

### Metamorfismo de fondo oceánico

Se produce en las zonas de dorsales oceánicas donde la corteza joven presenta temperaturas elevadas y la circulación del agua del mar, calentada en el interior de grietas muy profundas produce un metamorfismo de tipo hidrotermal. A pesar de su carácter local, es muy difundido debido a que la expansión del fondo oceánico es ininterrumpida, dejando la impronta de este metamorfismo hidrotermal incluso en las zonas de subducción.

### Metamorfismo de impacto

Se produce exclusivamente en los lugares de choque de los meteoritos sobre la superficie terrestre, pudiendo alcanzar esa zona elevadas presiones y temperaturas, produciéndose la transformación de algunos minerales.

### MINERALES COMUNES EN ROCAS METAMÓRFICAS

Por ser las rocas metamórficas la transformación de rocas ígneas y sedimentarias previas, los minerales más abundantes son también los silicatos. Los más típicos son el cuarzo, los feldespatos, las micas, piroxenos y anfíboles, siendo estos últimos también frecuentes en rocas ígneas. Pero además son comunes otros minerales como el disteno, la sillimanita, andalucita, estaurilita y algunas variedades de granate que caracterizan solamente a las rocas metamórficas, ya que éstos se forman en condiciones de presión y temperatura

superiores a las de las rocas ígneas, y por lo tanto su presencia en una roca es una buena guía para clasificarla como metamórfica.

Se puede clasificar a las rocas metamórficas en base a minerales más comunes. Los términos de la clasificación estructural/composicional que se mostrará luego, pueden ser definidos estrictamente atendiendo a los porcentajes relativos de los minerales más comunes: cuarzo, feldespato potásico, micas, anfíbol, piroxeno, plagioclasas y granate.

### CLASIFICACIÓN DE ROCAS METAMÓRFICAS

Para clasificar una roca metamórfica es necesario conocer su textura, su mineralogía y además, deducir, a partir de esta última, las condiciones de presión y temperatura de formación. De esta forma, podemos tener rocas metamórficas de bajo, medio o alto grado metamórfico. Para clasificar a las rocas metamórficas se utiliza el concepto de facies metamórficas. Una facies está definida por un rango de temperatura y presión, por lo tanto, una determinada roca metamórfica, pertenecerá a una u otra facies según las condiciones de presión y temperatura a la que se formó (imagen 38).

Los minerales de una roca metamórfica acusan las condiciones físicas bajo las cuales ésta se formó, por lo tanto pueden ser usados como geotermómetros y geobarómetros. Una roca metamórfica es una fuente de información sobre las temperaturas que reinaron en un determinado lugar del interior de la Tierra, y esto está en relación directa con la actividad de las placas litosféricas de ese sector, es decir, que al igual que las rocas ígneas, éstas son muy buenas indicadoras de los ambientes tectónicos.

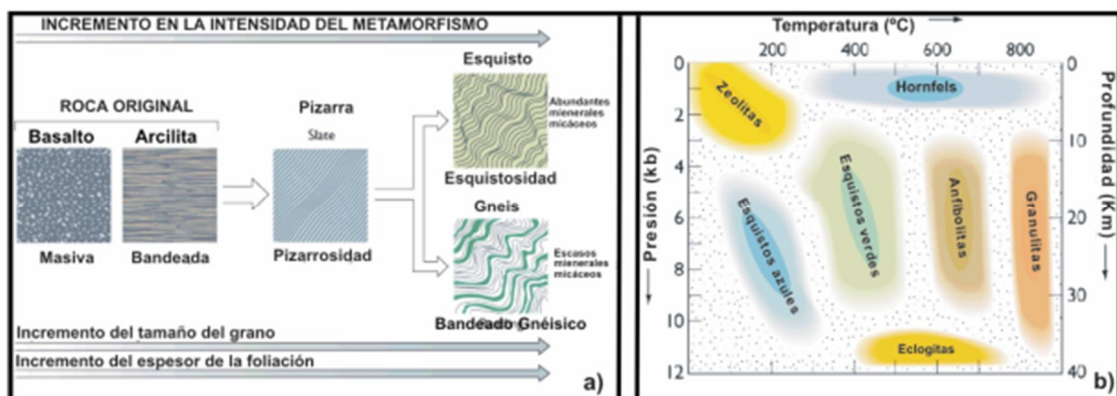


Imagen 38. Clasificación de rocas metamórficas: a) Clasificación según su aspecto y desarrollo de la planeidad de origen metamórfico. b) Clasificación según las condiciones de presión y temperatura; cada roca metamórfica puede ser incluida en alguno de los grandes grupos de facies. FUENTE. Guía de trabajos prácticos, Cátedra de Geología General, Universidad de Córdoba.

## Textura

Las rocas metamórficas tienen exclusivamente textura cristaloblástica. Los minerales, que se denominan blastos, crecen en un medio esencialmente sólido por transformación de minerales preexistentes, o como resultado de alguna reacción entre dos o más fases preexistentes. Dicho proceso se denomina blástesis, y a la textura resultante se la denomina cristaloblástica.

La aparición de una textura cristaloblástica supone la desaparición de cualquier otra textura que existiera anteriormente en la roca original o protolito. Sin embargo, en áreas metamórficas de bajo grado, pueden quedar restos de la textura original de la roca como relictos.

Las texturas cristaloblásticas pueden ser agrupadas en cuatro tipos morfológicos dependiendo del hábito de los cristales que la forman.

Estos cuatro grupos deben ser tomados como términos extremos o miembros finales, siendo cualquier otra textura una combinación de dos o más de ellos. Las cuatro texturas se representan esquemáticamente en la figura 28 y pueden ser definidas de la siguiente manera:

- Textura granoblástica (Imagen 39a)

Los cristales forman un mosaico de granos, más o menos equidimensionales, con fuerte tendencia al empaquetamiento hexagonal. Es característica la presencia de puntos triples (contacto entre tres granos) a  $120^\circ$  aproximadamente. Esta textura es característica de algunas rocas monominerálicas, como cuarcitas y mármoles, de rocas poliminerálicas granulíticas, así como de rocas desarrolladas en metamorfismo estático en aureolas de contacto (corneanas) sea cual sea la composición mineral.

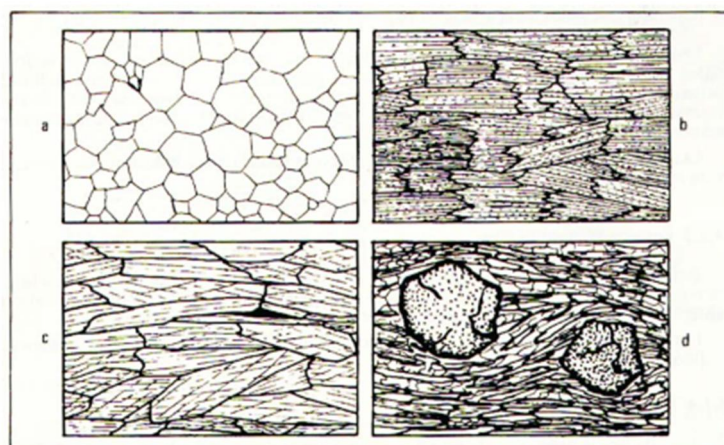


Imagen 39. Los cuatro tipos de texturas Cristaloblásticas. a) Granoblástica; b) Lepidoblástica; c) Nematoblástica; d) Porfidoblástica. FUENTE. Guía de trabajos prácticos, Cátedra de Geología General, Universidad de Córdoba.

Las rocas más comunes con textura granoblástica son: cuarcitas, mármoles, eclogitas, corneanas y algunos gneises.

- Textura lepidoblástica (Imagen 39b)

Definida por minerales laminares (filosilicatos) intercrecidos y homogéneamente orientados con los planos basales más o menos paralelos entre sí. No siempre los filosilicatos definen una textura lepidoblástica. Las rocas más comunes con textura lepidoblástica son las micacitas, esquistos micáceos y algunos gneises.



*Imagen 40. Textura lepidoblástica. Micacita*

- Textura nematoblástica (Imagen39c)

Definida por minerales aciculares (generalmente anfíboles) entrecrecidos y orientados homogéneamente con sus ejes mayores paralelos entre sí. Las rocas más comunes con textura nematoblástica son las anfibolitas y algunos gneises anfibólicos.



*Imagen 41. Textura nematoblástica. Anfibolita.*



- Textura porfidoblástica (Imagen 39d)

Definida por la existencia de cristales de mayor tamaño (porfidoblastos) que la matriz. Morfológicamente es igual a la textura porfídica en las rocas ígneas. La matriz puede ser afanítica o fanerítica y tener cualquier textura de las descritas anteriormente, o alguna combinación de dos o más de ellas.



*Imagen 42. Textura porfidoblástica.*

### CLASIFICACIÓN Y NOMENCLATURA

A diferencia de las rocas ígneas que poseen una sistemática internacional, las metamórficas no poseen una clasificación composicional precisa, existiendo en muchos casos cierto confusionismo de nomenclatura entre distintos autores y/o escuelas. Es evidente que, a pesar de la amplia variedad de rocas metamórficas existentes, su sistemática no posee excesivo interés frente al que tiene la determinación de paragénesis minerales y su variación espacial en áreas metamórficas. De este modo se utilizan sólo algunos nombres, que abarcan grandes grupos de rocas de composición variada, pero con características texturales y estructurales comunes. Además de esta clasificación estructural/composicional, se puede proponer otra estrictamente composicional basada en los minerales más comunes. En esta última, se pretende establecer límites composicionales precisos para los términos estructurales de la primera clasificación.





### Clasificación basada en los rasgos estructurales y composicionales

Tan sólo una decena de nombres es suficiente para designar todas las rocas metamórficas más comunes existentes en la naturaleza. Estos nombres se basan principalmente en características texturales, estructurales y composicionales.

Atendiendo a las características estructurales, se pueden establecer dos grandes grupos de rocas metamórficas:

- 1) Rocas foliadas o esquistosas.
- 2) Rocas no foliadas o masivas.

En el primero están incluidas las pizarras, filitas, esquistos, anfibolitas, gneises y migmatitas. En el segundo grupo están las corneanas, granulitas, cuarcitas, mármoles y eclogitas.

Esta nomenclatura tiene la ventaja de poder ser aplicada con cierta facilidad, incluso en el campo, y de ser fácilmente recordada. No obstante, esta terminología por simple es ciertamente insuficiente, siendo preciso asignar adjetivos composicionales en determinados casos.

El caso más sobresaliente es el de los esquistos y gneises, que pueden presentar una composición muy variada. En este caso, se suele posponer un término mineralógico al término estructural; p. ej. *Esquisto cuarzo-feldespático*, *esquisto biotítico*, *gneis anfibólico*, etc.



ROCA	TAMAÑO DE GRANO	RASGOS COMPOSIC.	ESTRUCTURAS y MICROESTR.	TEXTURA	METAMORFISMO
FILITA	afanítica	sericita (Q) (Cl), (Bi)	esquistosidad	lepidoblást.	regional bajo grado
ESQUISTO	fanerítica	menos de 20% de fk	esquistos. y band. compos.	lepidoblást. granolepid.	regional, bajo y medio
ESQUISTO NODULOSO	fanerítica	= esquistos + Cord, And	esquistos. y nódulos meta.	lepidoblást. granolepid.	contacto bajo grado
CORNEANA	afanítica a fanerítica	composición variada	masiva o band. isótropa	granoblást.	contacto gr. medio y alto.
GNEIS	fanerítica	más de 20% de fk	band. esquist. fol. metam.	granolepid. granonemat.	regional gr. medio y alto.
ANFIBOLITA	fanerítica	anfíbol	band. o masi. esquis. lin.	nematoblást.	regional gr. bajo y medio.
GRANULITA	fanerítica	minerales anhidros	masiva o band. isótropa	granoblást.	regional grado alto.
CUARCITA	fanerítica	cuarzo	masiva (isótropa)	granoblást.	regional (contacto)
MARMOL	fanerítica	calcita dolomita	mas. o band. isótropa	granoblást.	regional (contacto)
ECLOGITA	fanerítica	onfacita granate	mas. o band. isótropa	granoblást.	regional alto grado

Tabla 4. Características principales de las rocas metamórficas más comunes. FUENTE: Petrogénesis De Rocas Metamórficas, Editorial: H. Blume, Helmut G.f. Winkler, 1975.

### LOS PREFIJOS ORTO Y PARA

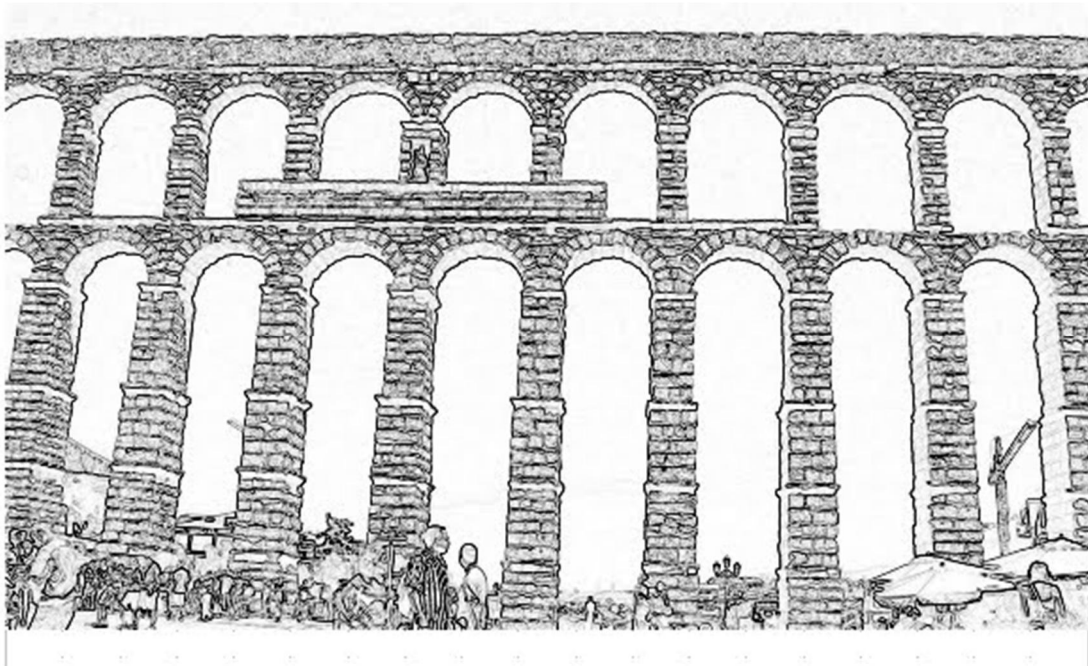
Como se indicó anteriormente, las rocas metamórficas se originan por transformación en estado sólido de rocas preexistentes de cualquier composición y naturaleza. Existen, por otra parte, rocas de marcada similitud composicional pero desarrolladas en ambientes geológicos diferentes. Este es el caso de los granitos, riolitas y arcosas, compuestas todas esencialmente de cuarzo y feldespatos, con escasa proporción de material pelítico (micas, arcillas, etc.).

Todas estas rocas, al ser metamorfizadas en ciertas condiciones, pueden dar como resultado rocas metamórficas gneísicas (gneises cuarzo-feldespáticos) en las que difícilmente puede determinarse la naturaleza ígnea o sedimentaria del protolito original. Otro ejemplo lo constituyen las anfibolitas. Estas pueden originarse, tanto a partir de rocas ígneas básicas, como de rocas calcosilicatadas sedimentarias. Cuando puede conocerse la naturaleza del protolito original, ígneo o sedimentario, mediante datos geoquímicos y/o de campo, es preciso indicar este dato en la nomenclatura de la roca metamórfica estudiada. Esto se hace anteponiendo el prefijo *orto* (ortogneis, ortoanfibolita) cuando el protolito es de naturaleza ígnea, y el prefijo *para* (paragneis, paraanfibolita) cuando se trata de protolitos sedimentarios.

Gneises y anfibolitas, son las rocas en que suele darse esta convergencia composicional, y en las que se suelen usar, por tanto, los prefijos orto y para.

## CAPITULO II.

# LAS ROCAS COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN



## CAPITULO II .LAS ROCAS COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN

### 1. INTRODUCCIÓN.

Por su gran cantidad de variedades, aspectos y prestaciones, la piedra constituye un material sumamente heterogéneo y fundamental para concebir el desarrollo de las civilizaciones.

Aunque desde un punto de vista cualitativo sus usos tradicionales básicamente, análogos a los contemporáneos, existen importantes variaciones en la intensidad de esos usos, mientras que la piedra sin labrar se utiliza en palacios, edificios militares y religiosos desde tiempos remotos, las técnicas de cantería se desarrollan entre 3.000 y 5.000 años a.C. En Egipto, no es sino hacia el año 2600 a.C. cuando aparecen los primeros monumentos en piedra labrada. Desde allí pasan a Fenicia y Grecia, dando origen a edificaciones como el Partenón (447 a 432 a.C.) o Ampurias<sup>5</sup> (575 a.C.).



*Imagen 44. Templo del Partenón, situado en la Acrópolis, Atenas, Grecia.*



*Imagen 43. Restos de la antigua ciudad de Ampurias.*

<sup>5</sup> Ampurias fue una ciudad griega y romana situada en el noreste de la península Ibérica, en la comarca gerundense del Alto Ampurdán. Fue fundada en 575 a. C. por colonos de Focea como enclave comercial en el Mediterráneo occidental. Fuente: Almagro Basch, M. Ampurias, historia de la ciudad y guía de las excavaciones. 1951.





La piedra es un material que trabaja muy bien a compresión, pero presenta mucha menor resistencia a flexión y tracción. Para cubrir o salvar espacios utilizando piedra se desarrollan el arco y la bóveda. Se debe a la arquitectura caldea, en Mesopotamia, en el tercer milenio a.C, la aportación fundamental que constituye el descubrimiento de estas estructuras. Desde allí pasan a los etruscos y de éstos a los romanos. Estos últimos lo difunden por el Mediterráneo, permaneciendo durante la Edad Media, el Renacimiento y el Barroco hasta nuestros días.

Los romanos utilizaron la piedra, no sólo como materia, estructural, sino también como elemento ornamental en revestimientos. Se desarrolla al mismo tiempo un importante comercio de piedra de calidad, principalmente mármol (hasta entonces se utilizaban fundamentalmente materiales locales). Este período de esplendor decae con el fin del Imperio.

La entrada de los árabes significó la explotación intensa del mármol de Macael en España, dejando edificaciones tan señeras como La Alhambra, la Mezquita de Córdoba o Medina Azahara. Sin embargo, el oficio de cantería tampoco fue olvidado en la España cristiana como queda patente en numerosas edificaciones religiosas, residenciales y militares de gran calidad.



*Imagen 45. Fachada del Colegio de San Ildefonso, Madrid.*

Posteriormente, los métodos de cantería se van perfeccionando durante el Renacimiento y el Barroco, sin que experimenten ningún cambio transcendental hasta la Revolución industrial. Para la construcción de la fachada renacentista del Colegio de San Ildefonso en Alcalá de Henares, por ejemplo, se

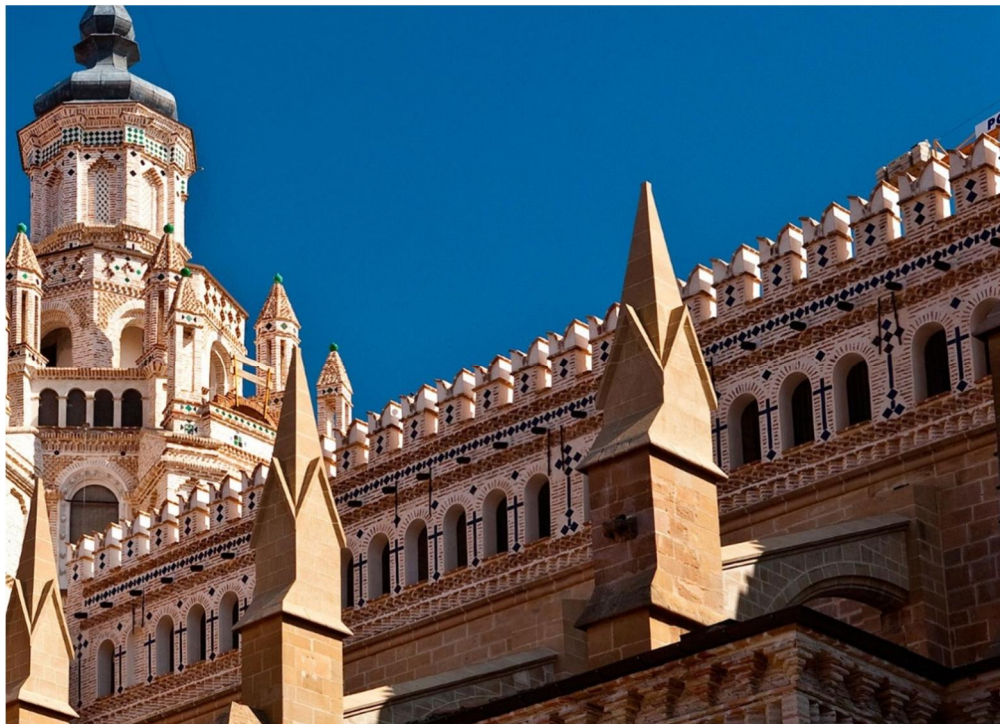


transporta la piedra en carretas de bueyes desde la cantera de Oncerruecas a unos 30 km de la obra; para el Puente de Toledo y gran parte del Madrid histórico se explotan las canteras de "piedra berroqueña" (granito) de la sierra de Guadarrama, a unos 40 o 50 km, principalmente ubicadas en Galapagar, Alpedrete, Villalba, Moralarzal, El Berrueco y Colmenar Viejo.

La Revolución industrial implica un cambio sustancial en la manufactura y colocación de la piedra, cuál es la disposición de energía eléctrica, aire comprimido, explosivos y maquinaria pesada para arranque, transporte, corte y labrado.

Hoy en día, España constituye un país exportador, comenzando a desarrollarse la piedra como industria en los años sesenta y alcanzando los mercados internacionales en los ochenta. La desaparición de los aranceles con entrada en la CEE supuso un fuerte impulso a la exportación a países europeos. En la actualidad, la piedra española se está utilizando en regiones tan lejanas como China, EE UU o Japón.

Mientras que tradicionalmente ha predominado el uso estructural de la piedra sobre el ornamental, actualmente ocurre lo contrario, al haber sido sustituida por el hormigón en aquella función. Este uso ornamental de la piedra parece deberse tanto a la añoranza por la naturaleza en un mundo enormemente tecnificado que ha hecho aflorar el gusto por los materiales "vistos", como a la disponibilidad de fuentes de energía más allá de la animal y humana, lo que permite labrar, con relativa facilidad, un material duradero y de calidad.



*Imagen 46. Catedral de Tarazona, construida con arenisca local poco resistente a la alteración. Mucha de la piedra ha tenido que ser sustituida.*

La demanda de prestaciones entre una y otra forma de ser utilizada la piedra (la tradicional y la actual, ha llevado a diferentes criterios de selección del material en los distintos tiempos. Mientras que, históricamente, cuando el transporte se tenía que hacer en carreteras de bueyes la distancia primaba sobre la calidad, hoy en día esta ecuación ha invertido sus términos.



Imagen 47. Pirámide Maya Gran Jaguar en Tikal, Guatemala.

Además cuando no existían herramientas para el cálculo del material resistente mínimo necesario, las estructuras, simplemente, se sobredimensionaban, de forma que casi cualquier piedra cumplía ampliamente los requerimientos de resistencia. Tampoco debía inquietar, antiguamente, la baja calidad en cuanto a la capacidad del material para soportar la agresividad de los

agentes de degradación. Simplemente, dicha baja calidad del material local se compensaba recubriendo la piedra de capas, pátinas, pinturas o jabelgas, consideradas como el acabado de la obra arquitectónica y cuya función era tanto protectora y sacrificial<sup>6</sup>, como ornamental. La Pirámide maya del Gran Jaguar en Tikal (Guatemala), por ejemplo, fue construida en caliza de muy mala calidad, incapaz de soportar el ambiente tropical, muy agresivo, en que se encuentra. Pero estos monumentos se encontraban encalados. Este revestimiento soportaba las inclemencias, siendo repuesto periódicamente a medida que se iba deteriorando. Hoy en día, la conservación de su piedra desnuda es un problema, acudiéndose a reposiciones que van difuminando la autenticidad e integridad del monumento.



Imagen 48. Graderio del Gran Jaguar, se puede apreciar el deterioro de la caliza.

<sup>6</sup> Un revestimiento sacrificial es aquél destinado a deteriorarse salvando la piedra. Normalmente se trata de revestimientos superficiales y revocos en los que ocurren los procesos de degradación. Fuente: J.M. García de Miguel, *Tratamientos de conservación de la piedra, ladrillo y los morteros*. 2009

Tradicionalmente, debido a los precarios medios disponibles en comparación con los actuales, solamente en elementos arquitectónicos muy singulares (ornamentos, esculturas y portadas) o en zonas muy expuestas la alteración como esquinas, marcos de huecos arquitectónicos, zócalos, etc., se podía asumir el mayor costo inherente a piedra de mayor calidad.

Hasta el Renacimiento, en que se comienza a valorar el Patrimonio Histórico como testigo de nuestras señas de identidad, no es de extrañar que la piedra, un material costoso de extraer y labrar, se viniera reutilizando. Son numerosos los monumentos contruidos con elementos preexistentes, por ejemplo, la alcazaba árabe de Mérida, se eleva con sillares romanos y visigóticos reutilizados. No es raro encontrar, por ejemplo, piezas de mármol labradas con otro objetivo, utilizadas como sillares.



*Imagen 49. Reutilización de materiales romanos en la alcazaba de Mérida. Obsérvese la mala colocación de los sillares, la defectuosa estereotomía de las piezas y la presencia de elementos de mármol ajenos.*

Las características de la piedra también influyeron poderosamente en sus usos. Algunas piedras, por su textura finamente granular, admiten una talla delicada, incluso con herramientas tradicionales. Ejemplos son la piedra de Bernuy de Porreros o El Parral (Segovia), Quintanar de Escalada, caliza de Hontoria (Burgos), dolomía de Boñar, etc. Otras piedras como granitos sanos y calizas compactas constituyen elementos resistentes y de buena calidad, lo que ha llevado a que hayan sido muy utilizadas en sillería y piezas más vastas. Su granulometría es, por lo tanto, más grosera; sin embargo, no permite trabajos finos. Su alta compacidad les proporciona una fractura concoidea<sup>7</sup> o irregular

<sup>7</sup> La fractura concoidea o concoidal es un tipo de rotura propia de materiales frágiles, de composición homogénea, pero amorfa (isótropa), que al trocearse no siguen planos naturales de separación. Fuente: [http://es.wikipedia.org/wiki/Fractura\\_concoidea](http://es.wikipedia.org/wiki/Fractura_concoidea)



que conlleva el desprendimiento de lascas cuando se trata de ejecutar trabajos delicados, como ocurre por ejemplo con muchas calizas de páramo.

Entre unas y otras aparecen tipos de piedra que admiten ser labrados hasta cierto punto, pero no permiten filigranas, calados o esculturas con gran detalle. Estos tipos intermedios se han utilizado ampliamente en la labra de elementos tales como basas, fustes, cornisas, estatuas, capiteles, relieves y ornamentos sin un detalle excesivo. Pertenecen a este grupo ciertas calizas granitos ligeramente alterados y muchas areniscas. En la misma obra pueden coexistir los distintos tipos de acuerdo con su función. La Iglesia de San Vicente, en Ávila, por ejemplo, aparece construida en una variedad dorada de granito alterado (piedra de la cantera de La Colilla) que conforma una parte importante del Patrimonio Monumental de la ciudad. Esta piedra se ha utilizado en la sillería e incluso en bastantes elementos ornamentales de su portada, tales como basas y fustes, e incluso una de las arquivoltas, pero para los elementos más delicados, tales como esculturas, ornamentaciones de las demás arquivoltas, capiteles y figuraciones se ha empleado una caliza de grano fino.



*Imagen 50. Pórtico de la iglesia de San Vicente integrado por granito, para la ornamentación fina se ha utilizado caliza.*



*Imagen 51. Ornamentaciones en el granito de la portada churrigueresca del Antiguo Hospicio de Madrid.*

El granito es una roca que admite labra hasta cierto punto. Por ejemplo, en el Puente de Toledo y en la portada churrigueresca<sup>8</sup> del Antiguo Hospicio en Madrid (hoy en día museo municipal) el granito forma incluso las zonas ornamentadas, pero las esculturas más finas se han labrado en dolomía de los afloramientos cretáceos de la zona de Redueñas-El Vellón.

Dependiendo de su naturaleza y estado de alteración, la mayor parte de los granitos históricos no son granitos sanos como los que hoy en día se utilizan con fines ornamentales. La porosimetría revela esta circunstancia. Los granitos sanos, que se utilizan actualmente, presentan porosidades menores al 1% en volumen de poros, mientras que en los históricos lo normal es encontrar porosidades del 2,5 al 4%. Cuando ha sido posible observar sillares históricos partidos, se comprueba cómo el núcleo presenta porosidades análogas a la superficie, lo que descarta que la alteración sea superficial e inducida tras su puesta en obra. Más bien parece que en la construcción se colocaron granitos ya con cierta degradación en origen. Es lógico

<sup>8</sup> El churrigueresco es una etapa, así como un estilo arquitectónico de España, que se dio en la época del barroco y llegó hasta la Nueva España, donde se conoce como barroco estípite. Fuente: Historia de la Arquitectura Española. Volumen IV: Arquitectura barroca de los siglos XVII y XVIII, arquitectura de los Borbones y neoclásica. Editorial Planeta. Año 1986.



suponer que, históricamente, cuando no se disponía de otras fuentes de energía que la animal y humana, de forma que la extracción debería ser una labor penosa, se explotaran los tres o cuatro metros superficiales (hoy en día, esta cobertera alterada se retira para extraer granito sano). En otros casos, el material pudo ser extraído de zonas donde el granito ha experimentado procesos geológicos que lo han debilitado (zonas de falla donde la piedra ha sufrido procesos de cizalla y como consecuencia es ligeramente cataclástico). Adicionalmente, no sería de extrañar que muchos granitos históricos procedan de bolos de superficie, por lo que no aparece la



*Imagen 52. Bolos graníticos de superficie.*

cantera histórica de procedencia. Ahondando en este aspecto, es posible observar, cómo, en el mismo momento, el granito utilizado en la ornamentación puede aparecer muchos más alterado que el de sillería. La explicación puede encontrarse en el uso del material originalmente más degradado y más fácil de labrar para los elementos esculpidos, mientras que la sillería, menos trabajado, admitiría un material más entero.

Otro aspecto que conviene anotar es el amplio uso histórico de piedra local, muchas veces de baja calidad, como consecuencia de la precariedad en los medios de transporte. Esta característica negativa se compensaba cubriéndola con jabelgas<sup>9</sup> con función tanto sacrificial como ornamental. Las capas de protección

<sup>9</sup> La jabelga es una mezcla de cal, polvo de mármol (marmolina) y agua, muy similar al estuco pero a diferencia de éste, la consistencia de aplicación no es la de un mortero o pasta sino la de una pintura.  
Fuente: <http://es.wikipedia.org/wiki/Jabelga>



debían ser periódicamente renovadas. Restos de estas capas aparecen en las zonas abrigadas del lavado por las precipitaciones de muchos edificios monumentales. Es de lamentar que estos restos, testimonios históricos de forma de entender la terminación de la obra arquitectónica en los distintos tiempos pasen desapercibidos muchas veces en las labores de restauración, siendo eliminados por las operaciones de limpieza. El abandono de algunos monumentos o la eliminación intencionada de las capas protectoras ha llevado a la fuerte degradación de estas piedras locales de poca resistencia a la alteración, viéndonos obligados hoy en día a sustituir su función con protecciones a transparentes a basa de consolantes e hidrofugantes.

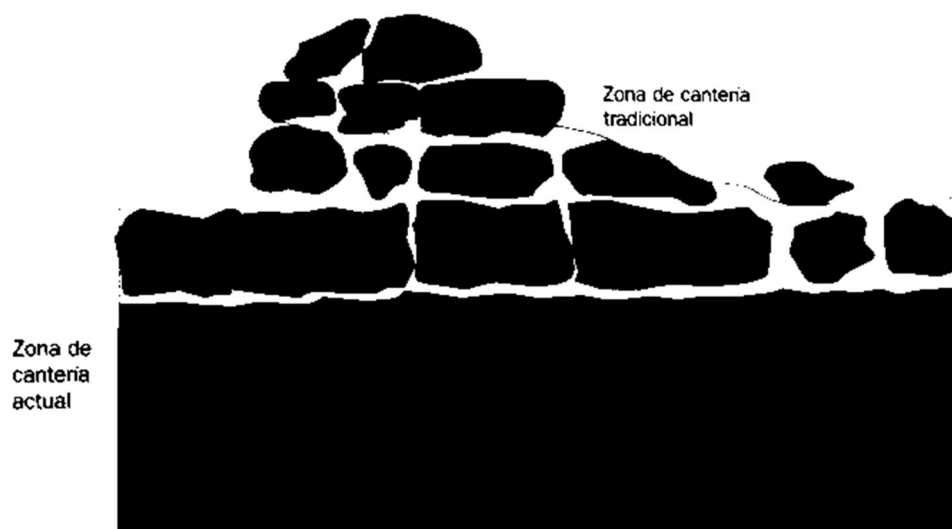


IMAGEN 53. Zonas de cantera en la antigüedad y en la actualidad.

## 2. EXTRACCIÓN Y LABRADO

La metodología de extracción y manipulación de la piedra de la cantera para uso posterior como roca de construcción u ornamental, ha sufrido un cambio drástico desde la mitad del siglo XX. Este cambio ha sido motivado por los requisitos de productividad exigidos en las diversas operaciones a las que se somete a la roca antes de la puesta en obra. Se ha pasado de la extracción de los bloques de roca con cuñas metálicas o de madera, a los modernos procesos de corte con hilo diamantado o con chorro de agua; del acabado manual al empleo de martillos neumáticos.

En general, los diversos procesos a seguir para transformar la piedra de un macizo rocoso en un producto comercial terminado se pueden agrupar en tres fases:

- Extracción de la cantera.
- Escuadrado y aserrado.
- Acabado superficial.

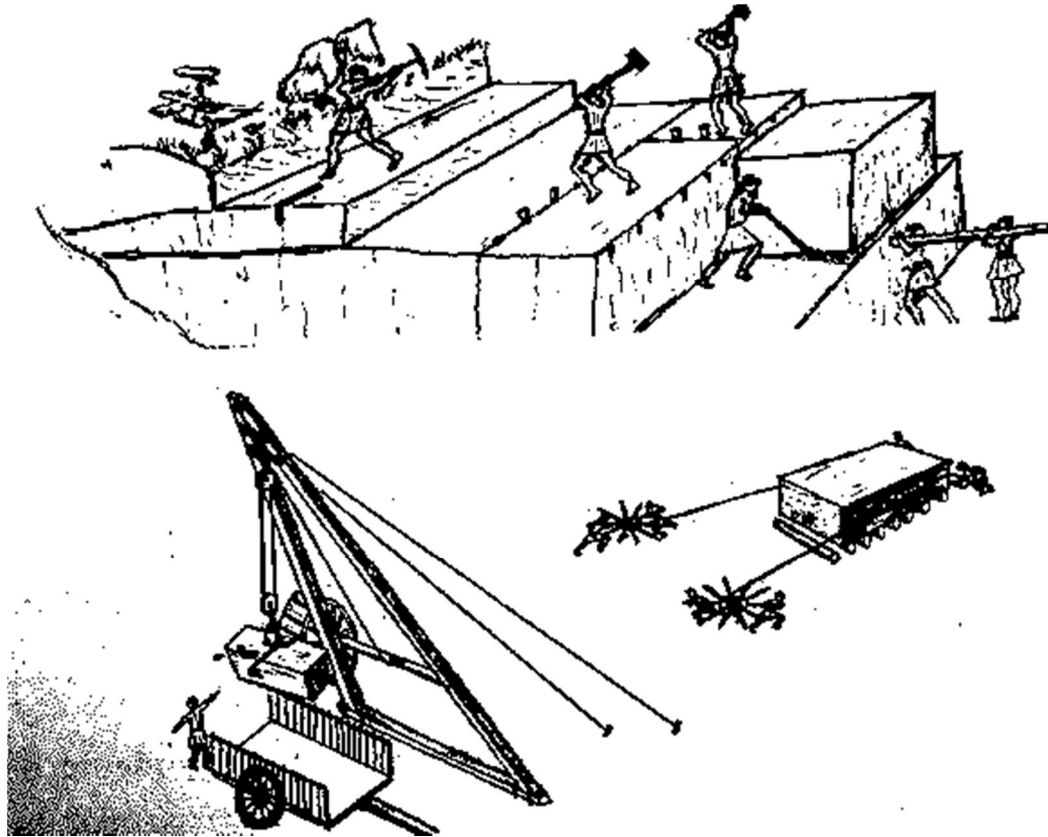
### EXTRACCIÓN

Para la extracción de la piedra, tanto ahora como antiguamente, los pasos son los mismos con pocas diferencias. Éstas residen, únicamente, en la disponibilidad actual de medios más potentes.



*Imagen 54. Cantera de pizarra en Ponferrada, León.*

La primera operación consiste en limpiar y dar forma a los frentes de arranque, para seguidamente extraer los bloques. Para esta última labor, los canteros tradicionales taladraban con maza y escoplo una serie de orificios alineados a lo largo de la línea de corte, normalmente coincidente con una dirección del diaclasado natural. En esos orificios se colocaban cuñas de hierro o madera que, convenientemente golpeadas con mazas, separaban el bloque del cuerpo del afloramiento.



*Imagen 55. Esquema del funcionamiento tradicional de las canteras.*

Hoy en día esta labor se realiza por distintos medios, entre los que se encuentran los explosivos, el cemento expansivo, la lanza térmica y el corte con hilo de diamante.

En la extracción de bloque con explosivo se utilizan o bien barrenadoras, que perforan individualmente cada orificio, o banqueadoras, que permiten ejecutar toda una línea simultáneamente. En ambos casos los dispositivos funcionan con aire comprimido. Los barrenos ejecutados se cargan con explosivo y se atracan para evitar que el tiro salga por la boca sin ejecutar trabajo útil. La detonación de los barrenos, si están bien diseñados y ejecutados, separan el bloque del cuerpo rocoso del afloramiento. El cemento expansivo puede sustituir a los explosivos en su función, es menos aparatoso implicando menores riesgos y menor pérdida de material por facturación del macizo que el corte con explosivo pero, en cambio, constituye un método sensiblemente más caro.

La lanza térmica consiste en una especie de soplete, de grandes dimensiones. La temperatura produce la decrepitación de los minerales de la roca transformándola en polvo escamoso a lo largo de un plano. La línea de corte puede tener una luz ligeramente por debajo de los 10 cm y las caras del bloque son más planas que en el corte con explosivo, con lo que se desperdicia menos material. Sus inconvenientes derivan de la enorme contaminación acústica e implica un riesgo para el operario, que debe estar convenientemente protegido contra el ruido derivado del método.

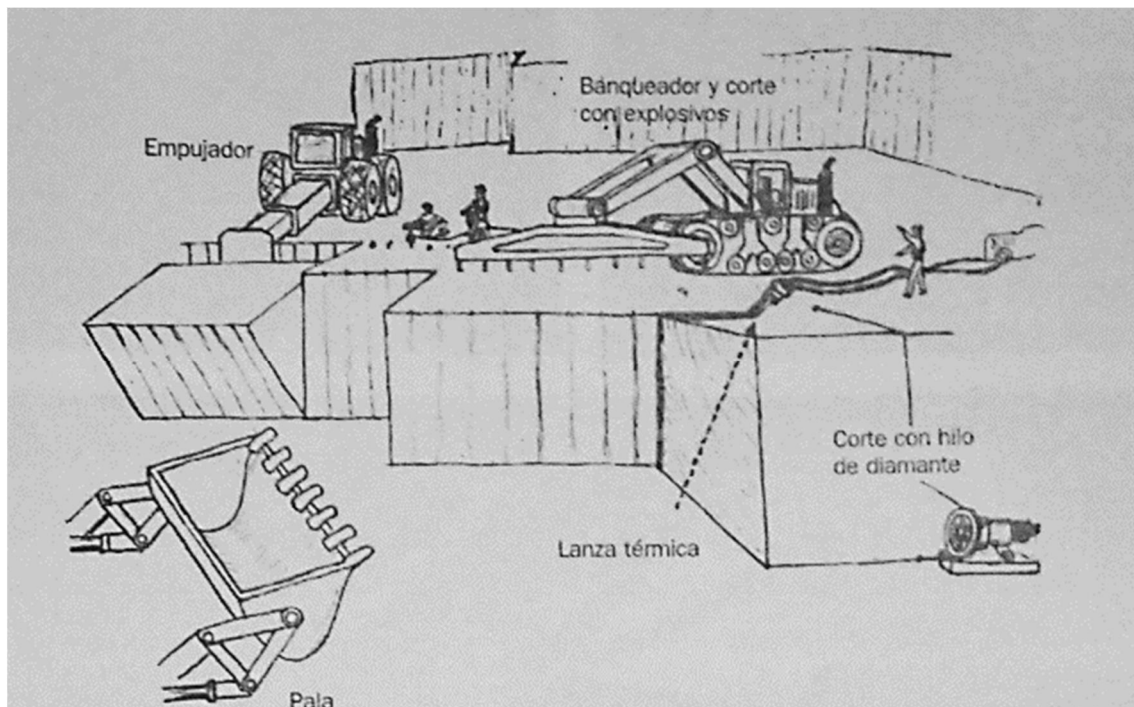


Imagen 56. Esquema del funcionamiento moderno de una cantera.



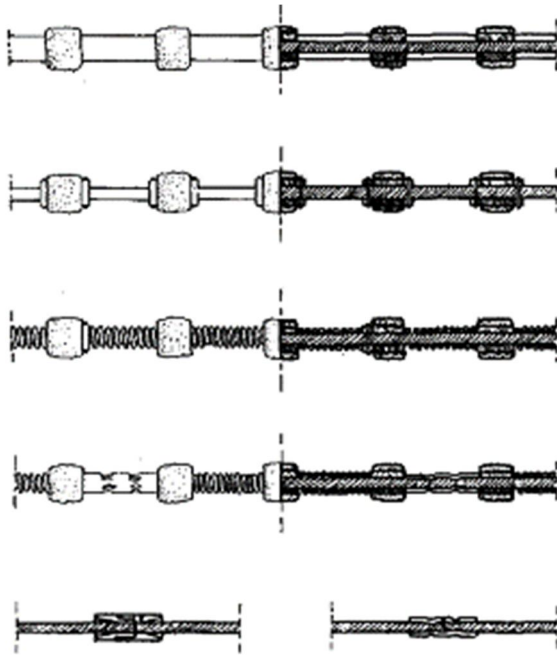


Imagen 57. Tipos de hilo diamantado.

En el corte con hilo, el macizo rocoso se secciona mediante un hilo diamantado accionado por un torno y un motor. El hilo de diamante está integrado por un cable de acero, forrado con un plástico muy resistente a la abrasión, en el que se han incluido, como las cuentas de un rosario, piezas elipsoidales o tóricas de bronce o sinterizado, con polvo de diamante (perlas). Lo que en realidad produce no es un corte, sino la abrasión y desgaste de la roca. La línea de corte es muy limpia, con una luz de unos 2 cm y, como consecuencia, se desperdicia mucho menos material. Se trata del método más caro, pero más limpio y con mayor recuperación, por lo que su uso se está imponiendo.

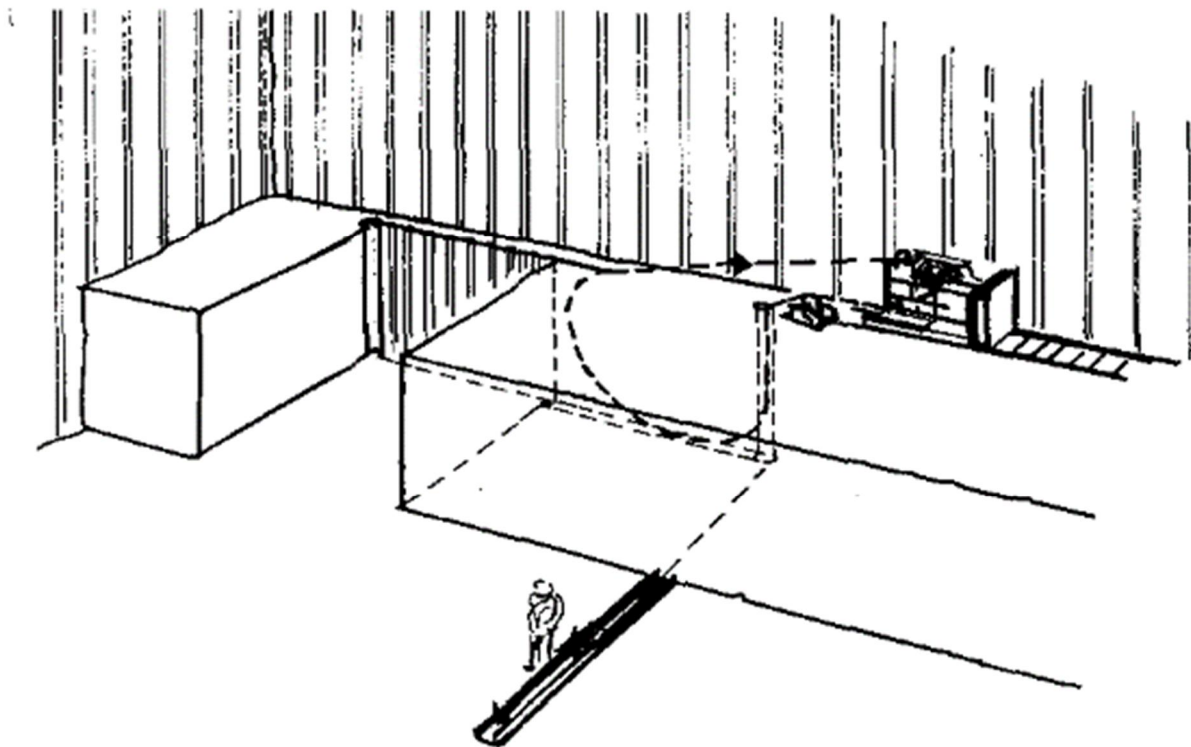
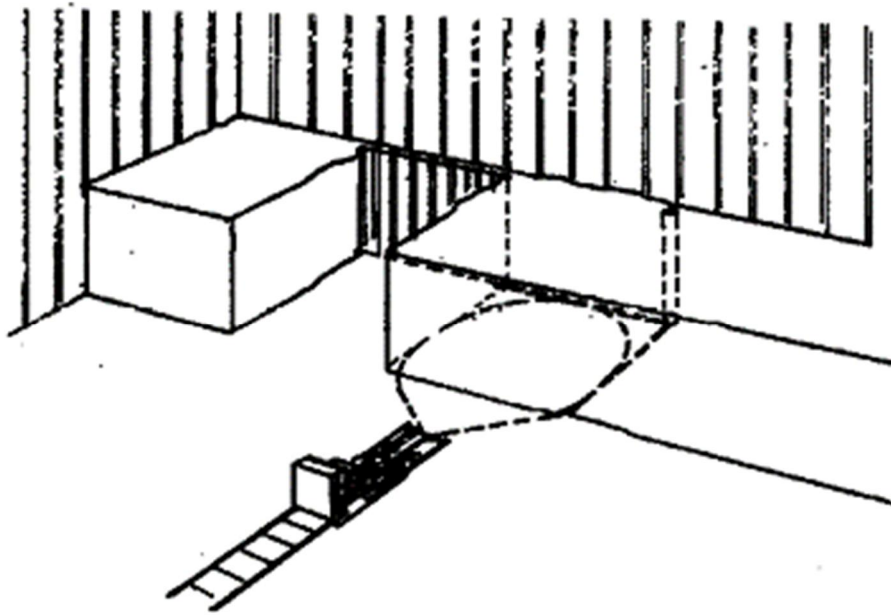


Imagen 58. Corte paralelo al frente una vez perforado el barreno horizontal desde la trinchera.



*Imagen 59. Corte horizontal con hilo.*

### ESCUADRADO Y ASERRADO

Una vez extraído el bloque, los antiguos canteros lo segmentaban en sillares al tamaño apropiado por el método ya descrito de las cuñas. De ser necesario, las caras se aplanaban mediante maza y cincel. Hoy en día los bloques se fragmentan y escuadran a tamaños adecuados en la misma plaza de cantera y se transportan a los telares donde se cortan en tableros u otras formas. Para esta última operación se usan, básicamente, dos tipos de dispositivo. Mediante uno de ellos los tableros se cortan uno a uno con un disco cuyo borde lleva una capa de bronce o sinterizado con polvo de diamante, que nuevamente produce un desgaste más que un corte. El movimiento del disco puede estar más o menos automatizado para cortar diferentes tableros a tamaños especificados, sin intervención del operario.

El otro método permite la obtención de varios tableros simultáneamente. Consiste en una batería de flejes de acero a los que se imprime un movimiento de vaivén, con un dispositivo de biela y manivela accionado por un pistón, con la intervención de un volante de inercia. Los flejes están regados, constantemente, con una suspensión de granatilla de acero u otro material abrasiva. El movimiento de la batería de flejes, por intermedio de la suspensión abrasiva, va produciendo el desgaste del bloque en tablas del espesor requerido, determinado por la distancia entre aquéllos. La batería va descendiendo hacia la base del bloque a medida que el corte se va produciendo, hasta la separación total de los elementos individuales.





Para trabajos finos, hoy en día se está utilizando el corte con agua. Consiste en un finísimo chorro de agua proyectada mediante una presión muy elevada, capaz de producir el corte limpio de muchos materiales, la piedra entre otros.



*Imagen 61. Cortabloques multidisco.*



*Imagen 60. Cortabloques monodisco.*

## ACABADO

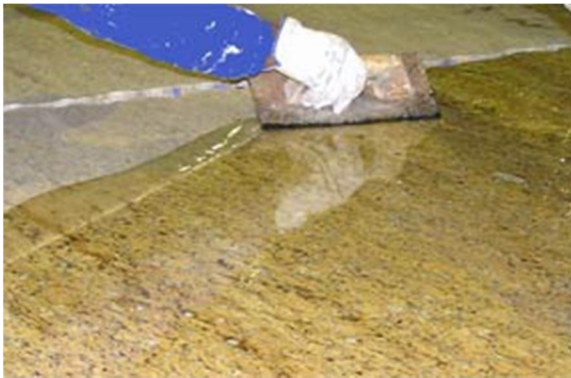
Bajo la denominación de acabados se reúnen todos aquellos procesos que proporcionan a las piezas su aspecto final una vez que su tamaño y forma son las requeridas para su uso. Dependiendo de éste, la pieza se puede dejar con la superficie tal como ha quedado con el corte o proporcionarle una apariencia diferente. Algunos acabados actuales coinciden con los tradicionales, tales como el "abujardado" (trabajo con la bujarda), escafilado" (trabajo con cincel) o "apiconado" (trabajo con puntero), etc.; única diferencia consiste en que actualmente se utilizan, en la labra, herramientas neumáticas o eléctricas con distintas bocas de trabajo. Otros tipos de acabado son exclusivos de tiempos recientes, como el "pulido", el "apomazado" (con la superficie trabajada con chorro de arena o piedra pómez), "aserrado" (tal como resulta del corte con disco o sierra) o "flameado" (donde se utiliza un soplete para hacer decrepitar los minerales de la superficie de la piedra hasta darle un aspecto liso, un poco jaspeado).



Imagen 62. Distintos tipos de bujardas y sus acabados superficiales. Fuente: J. Monjo Carrió, *Patología de cerramientos y acabados arquitectónicos*. 1994.

No todas las variedades de piedra admiten cualquier acabado. El pulido es el acabado más exigente; únicamente los granitos, mármoles y algunas calizas son susceptibles de recibir este tratamiento, mientras que las areniscas, debido a su textura, generalmente no se pueden pulir. Como terminación de la forma de los sillares, cabe mencionar el "almohadillado", consistente en rebajar el borde externo de las piezas resaltando el centro de las mismas. Este centro puede recibir, posteriormente, cualquier acabado.

Constituyendo la superficie de la piedra y la interfase a través de la que se producen la mayor parte de los procesos de alteración, es lógico suponer que para un mismo tipo de piedra y agresividad del ambiente la superficie específica derivada de la labra será proporcional a la velocidad con que actuarán esos procesos. Los métodos de limpieza poco cuidadosos que la incrementan deberían tener en cuenta este factor.



*Imagen 63. Aplicación de Resinas.*

Finalmente, hoy en día se utilizan tratamientos adicionales que mejoran las propiedades de la piedra. Entre ellos aparecen el resinado para aumentar la resistencia mecánica y evitar fallos por fisuras o pelos, o la colocación de placas de refuerzo a base de poliéster y fibra de vidrio, que permiten incrementar la resistencia a flexión de las piezas

destinadas a aplacados, al mismo tiempo que reducen el peso de las mismas.

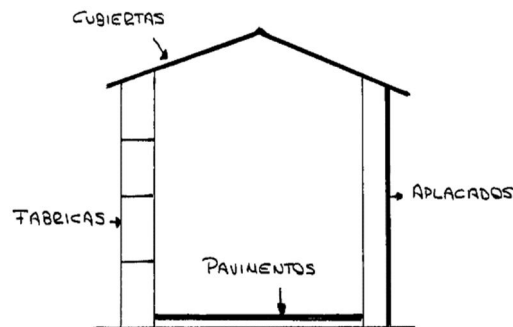
También se utilizan las resinas coloreadas hasta conseguir la entonación adecuada para rellenar defectos y oquedades. Las más empleadas son las de poliuretano y poliéster.

Estas medidas serán objeto de un estudio mucho más pormenorizado a lo largo del trabajo.

### 3. APLICACIONES

Las aplicaciones de los materiales pétreos naturales pueden dividirse en cuatro tipos distintos, según la función a cumplir en una obra (imagen):

- FÁBRICAS.
- PAVIMENTOS.
- CUBIERTAS.
- APLACADOS.



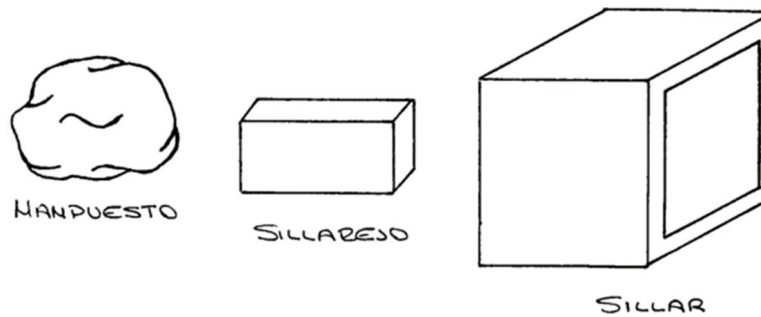
Para cada tipo de obra se fabrican piezas adecuadas, utilizándose para ello, las rocas apropiadas a su uso, es decir, que posean las propiedades a exigirles en su función. Por ello se divide el estudio de cada aplicación en tres apartados:

- MORFOLOGÍA DE PIEZAS Y NOMENCLATURA.
- EXIGENCIAS DE PROPIEDADES.
- MATERIALES PÉTREOS ADECUADOS.

#### 3.1. Fábricas

##### 3.1.1. Tipos de piezas

Las fábricas de piedra, son los elementos constructivos realizados con piezas aparejadas en seco o con mortero y que resisten mecánicamente a compresión (muros, pilares, arcos, bóvedas...). Se realizan con piedra, ladrillos, bloques... limitándonos en este apartado al estudio de las de piedra, prácticamente en desuso en la actualidad, pero de importancia fundamental en la historia de la construcción.



Existen tres tipos básicos de piezas para fábricas según el grado de labra y tamaño:

### MAMPUESTO

Se denominan mampuestos a las piedras de pequeñas dimensiones, de forma más o menos irregular, nada o apenas desbastadas, que puedan ser fácilmente manejadas por un solo hombre. Su peso oscila, según sus medidas y naturaleza, entre quince y veinticinco kilos, lo que supone un volumen del orden de una centésima de metro cúbico. Se utilizan para la realización de muros, procurando que encajen entre ellos o rellenando los huecos con piedra pequeña o ripios.

### SILLAREJO

Existen dos tipos de sillarejos:

**Sillarejos aplantillados.** Se denominan sillarejos aplantillados a las piezas manejables a mano, de volumen y peso análogos al de los mampuestos, de forma aproximadamente prismática recta, con una o más caras labradas y uniformes de tamaño, dentro de la hilada o aparejo de la fábrica en que se colocan. Se disponen en obra en aparejos de igual altura.

**Sillarejos toscos.** Se denominan sillarejos toscos a las piezas manejables a mano, de volumen y peso análogos al de los mampuestos y que, teniendo una forma aproximadamente prismática recta, no tengan ninguna cara labrada.

### SILLARES

Se denominan sillares las piezas de piedra de dimensiones tales, que exijan el empleo de útiles y mecanismos para su traslado y empleo (por ejemplo, grúas) y muy trabajadas con una o más caras labradas. Sus medidas rebasan los cuarenta centímetros, en dos direcciones al menos, cuando sean prismáticas rectas o se aproximan por exceso a esta cantidad, cuando sean aplantilladas. Su volumen, aproximadamente, de una vigésima parte de metro cúbico ( $50 \text{ dm}^3$ ) y su peso oscila, según sus medidas y naturaleza, entre los setenta y cinco (75) y los ciento cincuenta (150) kg.



Normalmente son de forma paralelepédica, aunque pueden adoptar otras muy diversas según su disposición en obra (cilíndrica, hexagonal, etc.). Su cara vista se llama paramento, las laterales juntas, la superior sobrelecho y la inferior lecho.

Casi todos los templos de la antigüedad, grandes catedrales, palacios, iglesias, etc., se construyeron utilizando como pieza base los sillares.

Según el nivel de labra se denominan sillería recta, moldurada, aplantillada (con entrantes y salientes), averrugada (borde fino y resto abujardado) almohadillada (todo labra fina).

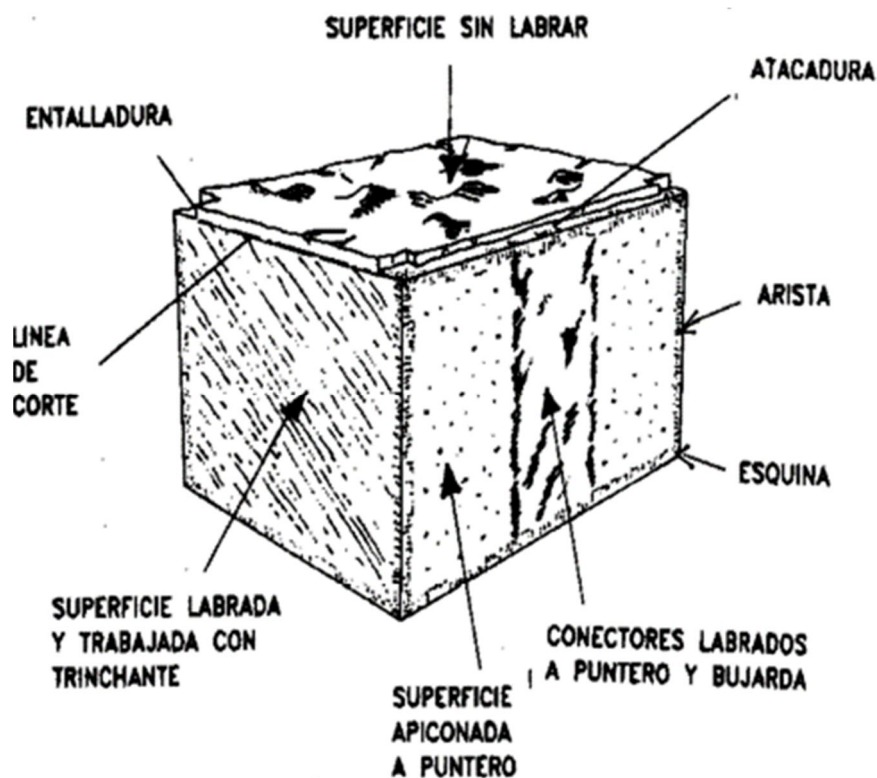


Imagen 64. Sillar, elementos geométricos.



### 3.1.2. Tipos de fábricas

Los tipos de fábricas adoptan la denominación del tipo de pieza utilizada en su realización:

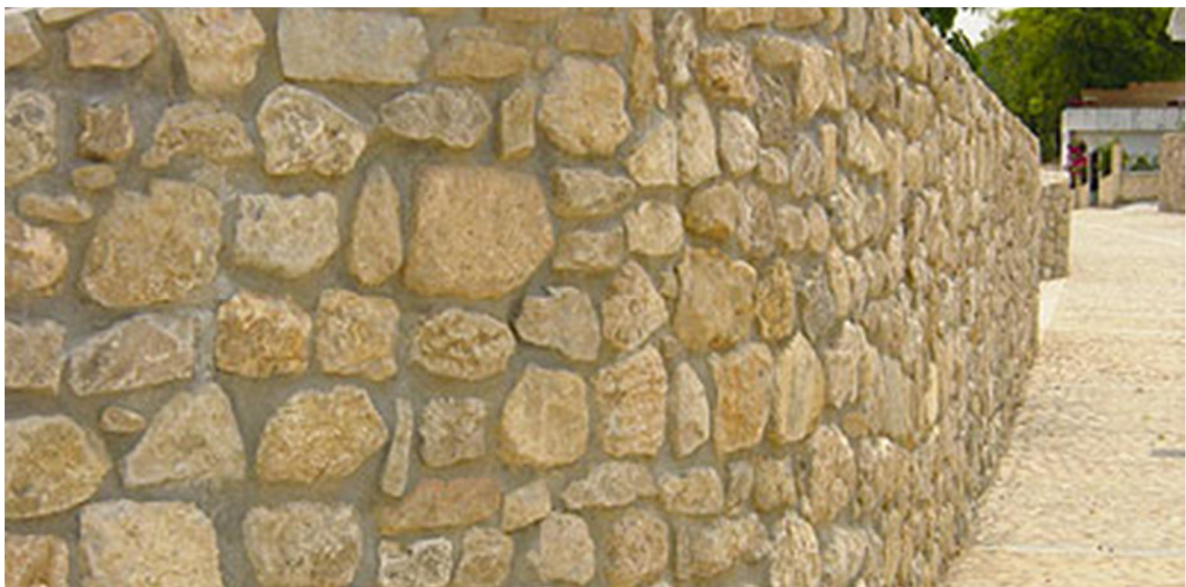
#### MAMPOSTERÍA (REALIZADA CON MAMPUESTOS)

Muros compuestos por piedras sin labrar de diferentes tamaños, en general pequeñas, colocadas de forma que se rellenen los huecos. Pueden ser en seco o con mortero de unión.

En la mampostería en seco no se emplea ningún tipo de mortero. Se utilizan unas piedras pequeñas llamadas ripios para acuñar los mampuestos y rellenar los huecos entre éstos. Por su parte, en la mampostería con un mortero de cal o cemento las piedras deben adaptarse unas a otras para dejar el menor porcentaje de huecos relleno de mortero. Es necesario dejar llaves que den trabazón al conjunto para evitar la junta vertical longitudinal.

Según su nivel de labra se denominan

- Ordinaria: Se ejecuta con un mortero de cal o cemento. Las piedras deben adaptarse unas a otras lo más posible para dejar el menor porcentaje de huecos relleno de mortero.



*Imagen 65. Muro de mampostería ordinaria con mortero.*

- Careada: Es la fábrica de mampostería cuyos mampuestos se han labrado únicamente en la cara destinada a formar el paramento exterior. Los mampuestos no tienen formas ni dimensiones determinadas. En el interior de los muros pueden emplearse ripios pero no en el paramento visto.



*Imagen 66. Muro de mampostería careada con junta en seco.*



- Concertada: Fábrica de mampostería cuyos mampuestos tienen sus caras de junta y de parámetro labradas en formas poligonales, más o menos regulares, para que el asiento de los mampuestos se realice sobre caras sensiblemente planas.



*Imagen 67. Muro de mampostería con junta de mortero rehundida 2cm.*

No se admite el empleo de ripios y los mampuestos del paramento exterior deben prepararse de modo que las caras visibles tengan forma poligonal y rellenan el hueco que dejan los mampuestos contiguos. Debe evitarse la concurrencia de cuatro aristas de mampuestos en un mismo vértice.

- Mixta: Con elementos de ladrillo u hormigón.



*Imagen 69. Mampostería mixta, compuesta por mampuestos alternados con ladrillos.*



*Imagen 68. Ejemplo de Mampostería mixta. Antiguo Matadero de Arganzuela, Madrid.*

### SILLERÍA

Se denominan así las obras que se ejecutan con sillares perfectamente aparejados con numeración de sus piezas dispuestos de tal forma que queden sostenidos mutuamente por yuxtaposición y sentándose unos sobre otros con la interposición de un mortero.

Si el sillar está colocado de tal forma que su dimensión mayor es paralela al paramento del muro, se dice que está colocado a soga; si es perpendicular a tizón; y si atraviesa todo el muro, llave.



*Imagen 70. Ejemplo de obra realizada con sillares .Ermita de San Bartolomé de Ucero del S. XV, Barranco del Río Lobos, Soria.*

El asiento de los sillares se suele hacer sobre una capa de mortero de 2 cm de grueso, la cual quedará reducida a 3 milímetros después de colocar el sillar y comprimirlo con mazo de madera. El contacto con los planos de juntas laterales se





hace a hueso, y se rellenan posteriormente las juntas con mortero muy fino. En el asiento definitivo no se deben usar ni cuñas ni calzos de ningún tipo. En ocasiones puede haber necesidad de unir la sillería con otros elementos empleados en la construcción mediante elementos metálicos. Así, para asegurar la trabazón se utilizan grapas o machihembrados de las piezas.

Existen una serie de reglas constructivas que garantizan la correcta ejecución de la obra, destacando por su importancia en el comportamiento del material las siguientes:

- En mampostería usar varios tamaños de piedra, sin rellenar huecos con mortero (usar ripios) y evitar que se toquen unas a otras pues no se transmiten las cargas correctamente en su superficie.
- En general buscar la trabazón de las piezas, evitando juntas continuas que perjudican la resistencia del conjunto. En vertical se hace "matando" las juntas y a lo ancho colocando llaves.
- Si se colocan con mortero se deben mojar las piezas pues mejora la adherencia al eliminar el polvo superficial.
- Las rocas sedimentarias deben trabajar con cargas perpendiculares a sus estratos para evitar el deslajamiento.
- Juntas: pueden realizarse de distintos tipos según el plano del muro: Rehundida, enrasada o resaltada.



Clasificación de las obras de sillería:

Distintos tipos de sillería.

1. Sillería recta.
2. Sillería aplantillada.
3. Sillería moldeada.
4. Sillería decorada.
5. Sillería averrugada.
6. Sillería almohadillada.

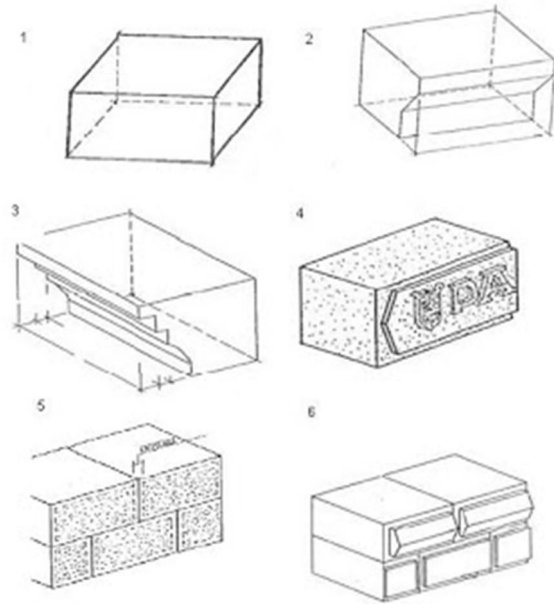


Imagen 71. Ejemplo de sillares almohadillados. Palacio de Carlos V, Madrid.

## 3.2. Pavimentos

Son la capa constituida por uno o más materiales que se colocan sobre el terreno natural o nivelado, para aumentar su resistencia y servir para la circulación de personas o vehículos.

### 3.2.1. Tipos de pavimentos

#### PAVIMENTOS INTERIORES

Losas colocadas a junta recta o trabajunta, ya que no importa en este caso la trabazón, sobre mortero nivelante. Suelen ir pulimentadas para mayor belleza y resistencia química. Buen resultado en mármoles, travertinos y pizarras. Se usan granitos en pavimentos de mucho tránsito.



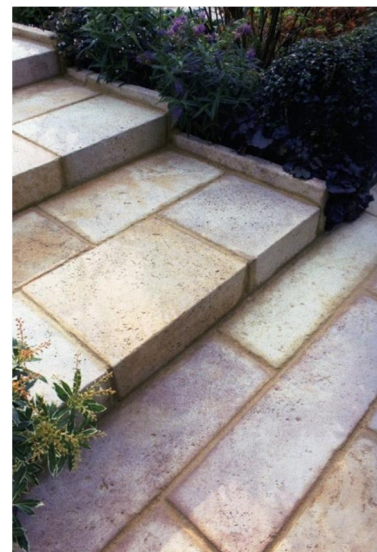
*Imagen 72. Pavimento interior realizado con mármol de Macael.*

#### PAVIMENTOS URBANOS

- Enlosados, con una disposición análoga a los anteriores pero con superficie antideslizante rugosa, variando únicamente la capa de adherencia y la capa de reparto. Se suelen usar granitos ya que el mármol no admite excesivamente bien el no estar pulido.



*Imagen 73. Enlosado de granito.*



*Imagen 74. Enlosado con travertino.*

- Adoquinados a junta recta sobre lecho de arena con aglomerante asfáltico para impermeabilizar. Buen asiento y durabilidad. Se usan basaltos o granitos.



*Imagen 75. Ejemplo de pavimento adoquinado.*





- Pavimentos venecianos a base de pequeñas piezas o tasquiles de mármol (Fragmentos que saltan de la piedra al labrarla) u otro material pétreo colocados de forma continua sobre mortero. Se deben dejar juntas de dilatación en grandes superficies.



*Imagen 76. Ejemplo de pavimento veneciano, aunque más comúnmente conocido por ser un terrazo ejecutado in situ.*



- Mosaico incierto de lascas (Trozos pequeños y delgados desprendidos de una piedra) o restos de labra de losas, encajando unas con otras sobre una capa de mortero.



*Imagen 77. Mosaico de lascas encontrado en la antigua ciudad Italiana de Ercolano.*



### 3.2.2. Tipos de elementos

#### LOSAS O PLACAS

Piezas cortadas a sierra con una dimensión que varían en función de su uso. Para pavimentos interiores los espesores suele ser de 3 a 4 cm., sin embargo en pavimentos exteriores pueden llegar a los 20 cm. Son estándar las de 30x30, 40x40, 40x60, etc. Su superficie puede estar pulida o rugosa con menor problema de deslizamiento (uso en exteriores).



*Imagen 78. Losas de granito.*

Se emplea en revestimientos de otros tipos de fábrica, en pavimentos y en cubiertas. Los revestimientos de mármol, y casi todo tipo de rocas ornamentales que admiten buen pulimento, suelen ser de este tipo.

Para estos usos, la piedra deberá estar exenta de defectos y cuando deban estar

colocadas en el exterior deberán cumplir toda una serie de condiciones que les permita resistir la acción de los agentes atmosféricos sin deformaciones ni alteraciones.

#### PELDAÑOS

Pueden ser despiezados en dos losas largas y estrechas, denominándose tabica a la vertical (15-20 cm. de altura) y huella a la horizontal (25-35 cm. ancho). El largo es variable siendo en edificaciones de 80-100 cm. Los enterizos más en desuso por su gran peso, son piezas prismáticas



*Imagen 79. Escalera compuesta por peldaños de granito.*

alargadas, presentando únicamente dos caras lisas ya que el resto queda oculto en obra.

### BORDILLOS

También de forma prismática de menor tamaño y cuya dimensión menor es el ancho (10-20 cm.) y la intermedia la vertical (20-30 cm.) con largo variable (sobre 60 cm.).

Se utiliza para delimitar pavimentos de distinto tipo o uso o marcar el límite de un pavimento.



### ADOQUINES

Pieza paralelepípedica análoga al sillarejo pero de dimensiones menores (15x18x10 cm.) y con una cara vista. Su resistencia a compresión comprobada en el laboratorio debe ser al menos de

130MPa.

Las rocas que se emplean en pavimentación suelen ser rocas de grano medio o fino. Tienen forma de tronco de pirámide con aristas vivas.

Su aplicación en firmes está en desuso por la mano de obra que exige su colocación aunque en restauraciones y en casos especiales todavía se utilizan.

### 3.3. Cubiertas



*Imagen 80. Casa con tejado de pizarra en Ibias. Asturias.*

Su aplicación es poco corriente en los materiales pétreos por su excesivo peso, se realiza con piedras lajosas, fácilmente divisibles en losas finas, en concreto el material pétreo por excelencia es la pizarra.

#### Morfología:

Losas o placas de reducido espesor, entre 4 y 6 mm y el resto de dimensiones muy superior, entre 200 y 600 mm. No deben ser muy grandes por su trabajo a flexión.

#### Exigencias:

- Físicas: Ligereza (Baja densidad). Impermeabilidad (Absorción agua < 0.7%).
- Mecánicas: Gran resistencia a flexión.
- Químicas: Resistencia agentes atmosféricos.



### Materiales:

Generalmente, pizarras exfoliables, tanto bituminosas (las de Galicia) como las silíceas más duras (de Segovia) cumplen las exigencias antes citadas, por resistencia a flexión, poco peso, impermeabilidad y resistencia química, además de su fácil trabajabilidad (corte y taladro).



*Imagen 84. Pizarras con cantos vivos.*

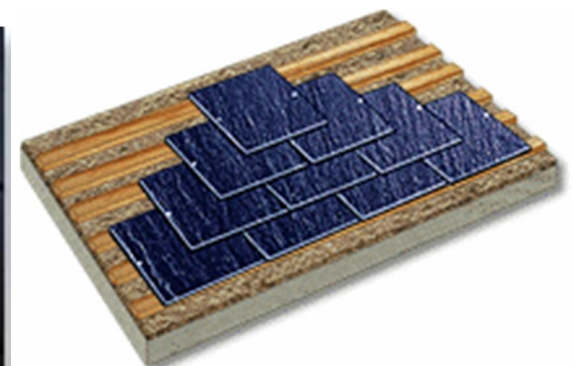


*Imagen 81. Pizarra una vez los cantos han sido cortados.*

En cuanto a la colocación, las piezas se cortan en dimensiones uniformes, normalmente rectangulares, aunque se adopta también la forma de "escama". Se realizan las perforaciones que permitan el claveteado al soporte de madera. Para ello se utilizan ganchos de acero cincado o inoxidable. Las piezas se solapan entre sí, tanto lateralmente como en el plano de cubierta, comenzando por la parte inferior o alero.



*Imagen 83. Diferentes formas de las pizarras.*



*Imagen 82. Colocación de tejado de pizarra.*

### 3.4. Aplacados

Son revestimientos verticales en paramentos, ya sean interiores o exteriores y cuya misión es de protección a los agentes atmosféricos, aunque en interiores es puramente decorativa.



*Imagen 85. Aplacado de cuarcita, colocado a trabajunta sujeto a la fachada directamente con mortero.*

#### Morfología:

Losas o placas similares a las de pavimentos aunque algo más delgadas (2 a 3 cm.) por no tener misión resistente. El corte puede ser cuadrado, rectangular o poligonal.

#### Exigencias:

- Físicas: Impermeabilidad. No ser heladizas. Baja conductividad térmica.
- Mecánicas: No son resistentes, en todo caso al impacto.
- Químicas: Resistencia a los agentes atmosféricos.



### Materiales:

Casi todos los pétreos son apropiados al no exigírseles una especial dureza y resistencia. Los porosos son más aislantes térmicos y adherentes al mortero, pero menos acústicos e impermeables.

Se utilizan tanto en interiores como exteriores, Mármoles, Travertinos, Calizas, Areniscas, Granitos, teniendo en cuenta que las piedras carbonatadas son débiles a la acción de agentes atmosféricos.

En cuanto a la colocación, con piezas rectangulares se suele usar el sistema de trabajajunta, por imitar a la sillería, ya que no tienen misión resistente.

El principal problema es el anclaje al paramento, que puede ser sujeción directa al soporte mediante un material de agarre o un anclaje mecánico formando una fachada ventilada o trasventilada.



*Imagen 86. Aplacado tomado con mortero.*



*Imagen 87. Aplacado colocado mediante montantes y anclajes mecánicos.*

La fachada ventilada se compone fundamentalmente de dos hojas. La interior, de carácter resistente o no, y la exterior de protección frente a la acción directa de la lluvia y el sol, separando a ambas una cámara de aire en movimiento que permite mantener la temperatura ambiental, eliminar, facilitando la evaporación, el agua que haya podido penetrar en ella y entre ambas capas los materiales aislantes y los



conectores o separadores elásticos de estas dos hojas, los anclajes. La ventilación puede conseguirse facilitando el "tiro" con aberturas practicadas en el arranque y coronación de la cámara o mediante juntas abiertas entre las piezas del aplacado o revestimiento que forman la hoja exterior.

La práctica usual de tomar las piezas con yeso o escayola es inaceptable ya que estos materiales, si bien son de fraguado rápido, son altamente higroscópicos y con la absorción de agua se reblandecen con el consiguiente desprendimiento de las piezas.

Los morteros de cemento no son prácticos por su lento fraguado aunque se pueden utilizar cementos cola, con el inconveniente de su fuerte retracción que puede desprender las piezas. La utilización de adhesivos como productos de agarre en aplacados de piedra natural es, desde el punto de vista mecánico, correcta. Sin embargo este tipo de sujeciones presenta dos tipos de problemas. Por un lado, la piedra no ventila correctamente, lo que en cierto tipo de climas puede ocasionar un envejecimiento prematuro del material.

Por otra parte resulta, más frecuente de lo normal, una mala colocación del adhesivo, bien por falta de conocimientos del operario, bien por un ahorro de producto, al no rellenar toda la superficie de contacto, ocasionando el desprendimiento repentino de las piezas.

La utilización de anclajes metálicos garantiza la fijación del sistema al soporte y la utilización de perfiles metálicos asegura una colocación perfecta e independiente del recubrimiento pétreo, respecto del soporte de colocación. Ahora, las losas pétreas se pueden colocar independientes respecto del soporte y del resto de las losas, por lo que se evita la acumulación de esfuerzos y por tanto el riesgo de roturas y desprendimientos. Además, el sistema de fachadas ventiladas representa un importante ahorro energético para las viviendas. El recubrimiento pétreo produce una cámara de aire con características intermedias, entre la atmósfera y el edificio, lo cual combinado con un aislamiento termo-acústico continuo, mejora la habitabilidad y reduce el coste en la climatización de la edificación.



Lo adecuado es utilizar arpones de acero cincado o inoxidable, sobre los que se apoya la pieza, impidiendo que carguen unas sobre otras y que se suelten. La cámara interior se puede rellenar o no con un mortero para mejor resistencia al impacto, pero entonces el aislamiento de la humedad es menor.

Debe quedar bien clara la limitación de las dimensiones de las placas de piedra que, salvo necesidades de proyecto muy justificadas, no deben dar superficies mayores de 1.00 m<sup>2</sup> (teniendo en cuenta la dificultad de montaje de placas mayores) y que el canto mínimo no debe ser menor de 30 mm en granitos de buena calidad y 40 mm en el resto de piedras calizas y mármoles, aumentándose estos valores mínimos en piedras muy porosas o veteadas como el travertino. En las imágenes pueden verse diversos aplacados de piedra natural.

#### 4. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LA PIEDRA

La piedra se caracteriza, mediante ensayos y análisis que informan sobre sus propiedades. Estos ensayos se pueden realizar con dos objetivos:

1. En obra nueva: averiguar la calidad del material respecto a ciertas características según el uso que se le va a dar y predecir su comportamiento; por ejemplo, si tiene suficiente resistencia mecánica para las cargas que va a soportar.
2. En análisis de patologías, en obra construida y Patrimonio Histórico: diagnosticar la causa de las mismas y testar el tratamiento para detenerlas; por ejemplo, si una hidrofugación conseguirá detener la entrada de humedad respetando la transpiración.

En el primer caso, los ensayos y análisis se sujetan a normas que permiten comparar calidades de los materiales entre sí y con un estándar. En el segundo y en el que se centra este trabajo, trata más bien de investigar cómo está respondiendo el material a ciertos procesos de degradación y cómo influirán las modificaciones o tratamientos que se puedan introducir para detenerlos.

Aunque en ambos casos los ensayos son similares, en el segundo la normalización no tiene sentido sino a efectos de describir el material y sus patologías con un lenguaje convenido, por lo que, a veces, es necesario diseñar los ensayos convenientes, para resolver el problema específico que se plantea, aunque, dichos ensayos, no se ajusten a norma.



#### **4.1. Caracterización en función de los usos en obra.**

De acuerdo con la utilización que se pretenda dar a la piedra, ésta ha de presentar ciertas características y propiedades en cuanto se refiere a resistencia mecánica, resistencia al desgaste, a la alteración, al agua, etc.

La Comisión Europea para la consecución del mercado único ha venido desarrollado una serie de directivas para la armonización de los requisitos técnicos de ciertos productos. La Directiva 89/106/CEE, modificada por la Directiva 93/68/CEE, versa sobre los productos de la construcción. El desarrollo de las directivas se ha estado llevando a cabo por el Comité Europeo de Normalización (CEN), del que procede la Norma CEN/TC 246 "Piedra natural".

Actualmente es obligatorio que los productos de piedra natural dispongan del marcado CE. Las siguientes tablas especifican la norma armonizada a aplicar para cada tipo de piedra y para cada uno de los usos a los que se le destine.





	USOS					TIPOS DE PIEDRA						
	Pizarra para techar UNE-EN 12326	Placas para revestimientos murales UNE-EN 1469-05	Plaquetas UNE-EN 12057-05	Baldosas para pavimento interior y escaleras UNE-EN 12058-05	Pavimento exterior UNE-EN 1341-02	Bloques en bruto UNE-EN 1467-04	Tableros en bruto UNE-EN 1468-04	Adoquines UNE-EN 1342-03	Bordillos pavimento exterior UNE-EN 1343-03	Granitos	Calizas y mármoles y cuarcitas	Areniscas y cuarcitas
Clasificación	UNE 22181-85											
Estudio petrográfico	UNE-EN 12326- 2:00 apdo. 17									UNE-EN 12407-01	UNE-EN 12407-01	UNE-EN 12407-01
Descripción petrográfica		UNE-EN 12407-02	UNE-EN 12407-02	UNE-EN 12407-02	UNE-EN 12407-02	UNE-EN 12407-02	UNE-EN 12407-02	UNE-EN 12407-02	UNE-EN 12407-02			
Densidad real y aparente y porosidad abierta y total						UNE-EN 1936-99	UNE-EN 1936-99			UNE-EN 1936-99	UNE-EN 1936-99	UNE-EN 1936-99
Absorción de agua	UNE-EN 12326- 2:00 apdo. 11	UNE-EN 13755-02	UNE-EN 13755-02	UNE-EN 13755-02	UNE-EN 13755-02			UNE-EN 13755-02	UNE-EN 13755-02	UNE-EN 13755-02	UNE-EN 13755-02	UNE-EN 13755-02
Resistencia a compresión								UNE-EN 1926-99	UNE-EN 1926-99	UNE-EN 1926-99	UNE-EN 1926-99	UNE-EN 1926-99
Cristalización de sales										UNE-EN 12370-99	UNE-EN 12370-99	UNE-EN 12370-99
Resistencia a las heladas	UNE-EN 12326- 2:00 apdo. 12	UNE-EN 12371:02	UNE-EN 12371:02	UNE-EN 12371:02	UNE-EN 12371:02	UNE-EN 12371:02	UNE-EN 12371:02	UNE-EN 12371:02	UNE-EN 12371:02	UNE-EN 12371-02	UNE-EN 12371-02	UNE-EN 12371-02
Resistencia a flexión bajo carga concentrada	UNE-EN 12326- 2:00 apdo. 10	UNE-EN 12372-99	UNE-EN 12372-99	UNE-EN 12372-99	UNE-EN 12372-99					UNE-EN 12372-99	UNE-EN 12372-99	UNE-EN 12372-99
Resistencia a flexión a momento constante										UNE-EN 13616-02	UNE-EN 13616-02	UNE-EN 13616-02
Coefficiente de dilatación térmica										UNE-EN 14581-06	UNE-EN 14581-06	UNE-EN 14581-06
Carga de rotura para anclajes										UNE-EN 13364-02	UNE-EN 13364-02	UNE-EN 13364-02
Resistencia a la abrasión		UNE-EN 14157-05	UNE-EN 14157-05	UNE-EN 14157-05	UNE-EN 1341-02 C			UNE-EN 1342-03 B		UNE-EN 14157-05	UNE-EN 14157-05	UNE-EN 14157-05
Microdureza Knoop										UNE-EN 14205-04	UNE-EN 14205-04	UNE-EN 14205-04

Tabla 5. Normativa aplicada a materiales pétreos de construcción. Fuente: Informstones Technic & Business S.L, Manual para el uso de piedra en la arquitectura.





	Pizarra para techar UNE-EN 12326	Placas para revestimientos murales UNE-EN 1469-05	Plaquetas UNE-EN 12057-05	USOS				Bordillos pavimento exterior UNE-EN 1343-03	TIPOS DE PIEDRA	
				Baldosas para pavimento interior y escaleras UNE-EN 12058-05	Pavimento exterior UNE-EN 1341-02	Bloques en bruto UNE-EN 1467-04	Tableros en bruto UNE-EN 1468-04		Granitos	Areniscas y cuarcitas
Módulo de elasticidad									UNE 22177-85	UNE 22177-85
Módulo de elasticidad dinámico									UNE-EN	UNE-EN
Envejecimiento por SO <sub>2</sub> en presencia de humedad 2:00 apdo. 15	UNE-EN 12326-								14146-04	14146-04
Resistencia al andaje		UNE-EN 13364-02	UNE-EN 13364-02	UNE-EN 13364-02					UNE-EN	UNE-EN
Controles dimensionales	UNE-EN 12326-2	UNE-EN 1469-05	UNE-EN 12057-05	UNE-EN 12058-05	UNE-EN 1341-02	UNE-EN 1467-04	UNE-EN 1468-04	UNE-EN 1343-03		
Resistencia al deslizamiento		UNE-EN 14231-04	UNE-EN 14231-04	UNE-EN 14231-04	UNE-EN 1341-02 D				UNE-EN	UNE-EN
Absorción capilar					UNE-EN 1925				UNE-EN	UNE-EN
Alterabilidad					UNE-EN 12326-2				UNE-EN	UNE-EN
Tamaño de grano									UNE 22171-85	
Resistencia al envejecimiento por choque térmico		UNE-EN 14066-03	UNE-EN 14066-03	UNE-EN 14066-03					UNE-EN	UNE-EN
Energía de rotura									14066-03	14066-03
Velocidad de propagación del sonido									UNE-EN	UNE-EN
Permeabilidad al vapor de agua		UNE-EN 12524:00	UNE-EN 12524:00	UNE-EN 12524:00					14158-04	14158-04
Reacción al fuego		UNE-EN 13501-1	UNE-EN 13501-1	UNE-EN 13501-1					UNE-EN	UNE-EN
Contenido en carbono no carbonatado	UNE-EN 12326 -2:00 apdo. 13								14579-05	14579-05
Contenido en carbonatos	UNE-EN 12326- 2:00 apdo. 14.2									
Ciclo térmico	UNE-EN 12326- 2:00 apdo. 16									

Tabla 6. Normativa aplicada a materiales pétreos de construcción. Informstones Technic & Business S.L, Manual para el uso de piedra en la arquitectura.

Mientras que unas normas abordan los ensayos a realizar sobre cada material según los usos a los que se le destine, otras describen dichos ensayos normalizados.

La normativa se puede sintetizar en la siguiente relación:

### Normas de productos

- UNE-EN 1341: Baldosas de piedra natural para uso como pavimento exterior. Requisitos y métodos de ensayo.
- UNE-EN 1342: Adoquines de piedra natural para uso como pavimento exterior. Requisitos y métodos de ensayo.
- UNE-EN 1343: Bordillos de piedra natural para uso como pavimento exterior. Requisitos y métodos de ensayo.
- UNE-EN 1469: Piedra natural. Placas para revestimientos murales. Requisitos.
- UNE-EN 12057: Productos de piedra natural. Plaquetas. Requisitos.
- UNE-EN 12058: Productos de piedra natural. Baldosas para pavimentos y escaleras. Requisitos.

### Normas de ensayos

- UNE-EN 1925: Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de coeficiente de absorción de agua por capilaridad.
- UNE-EN 1926: Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia a compresión uniaxial.
- UNE-EN 1936: Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la densidad real y aparente y porosidad abierta y total.
- UNE-EN 12371: Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia a la heladicidad.
- UNE-EN 12372: Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia a flexión bajo carga concentrada.
- UNE-EN 12407: Métodos de ensayo para piedra natural. Estudio petrográfico.
- UNE-EN 13364: Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la carga de rotura para anclajes.
- UNE-EN 13373: Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de las características geométricas de las unidades.
- UNE-EN 13755: Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la absorción de agua a presión atmosférica.
- UNE-EN 13616: Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia a flexión a momento constante.
- UNE-EN 14066: Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de resistencia al envejecimiento por choque térmico.
- UNE-EN 14157: Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia a la abrasión.
- UNE-EN 14231: Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia al desdiento mediante el péndulo de fricción.

En nuestro caso al pretender diagnosticar patologías y tratamientos, los ensayos en algunas ocasiones pueden diferir de la norma, ya que se realizan con distinto objetivo. En las líneas que siguen se describe el fundamento de unos y otros. Muchas veces, la única diferencia estriba en las especificaciones (tamaño de probetas, tiempo a que les somete a unas determinadas condiciones, etc.); otras veces, el ensayo para diagnóstico y tratamiento es más complejo ya que se requiere obtener información adicional, que el ensayo normalizado no proporciona.

## 4.2. Técnicas, análisis y ensayos.

### MICROSCOPIA ÓPTICA DE LUZ TRANSMITIDA.



*IMAGEN 88. Microscopio óptico. Usado en la identificación de minerales.*

Se fundamenta en la observación por transparencia, mediante un microscopio óptico bajo luz polarizada. La técnica permite apreciar directamente la mineralogía y textura de la roca. La información que proporciona se basa ampliamente en la experiencia del observador. La identificación de los minerales

se realiza a través de sus propiedades ópticas que se pueden reconocer con el microscopio al ser atravesada la preparación por la luz polarizada. Al ser posible observar los granos directamente, siempre que su tamaño sea superior al de resolución del instrumento (unos 1.000 aumentos que permiten apreciar partículas de 1 micra; lo normal es trabajar entre 40 y 120 aumentos), se aprecia, igualmente, la textura y porosidad de la roca. Se pueden efectuar estudios cuantitativos mediante la estimación del área ocupada por cada fase mineral, bien sea mediante estimación directa a través de la experiencia del petrógrafo o, con más precisión, contando los puntos de una red, que se superponen a cada una de esas fases.



Para preparar la muestra, se impregna al vacío un taco de la misma con una combinación de resina y fluoresceína. Se pega sobre un portaobjetos de cristal y se desbasta hasta el espesor adecuado de 30 micras. A ese espesor, la mayor parte de los minerales de las rocas son transparentes. Para distinguir los feldespatos, unos de otros, se tiñe la preparación con cobalto nitrito sódico. El feldespato potásico es el único que se tiñe de amarillo. Para distinguir los carbonatos (calcita de dolomita) se tiñe con alizarina. La calcita se tiñe de rojo, al contrario de la dolomita, que no resulta afectada.

#### ENSAYOS HÍDRICOS. COEFICIENTE DE ABSORCIÓN Y PESO ESPECÍFICO APARENTE.

Las probetas, una vez desecadas y pesadas, se sumergen en agua. El coeficiente de absorción es el tanto por ciento en peso de agua que absorbe en un tiempo determinado.

El peso específico aparente ( $P_e$ ) es la relación de peso por unidad de volumen. El volumen aparente se estima mediante una balanza hidrostática, se pesa la pieza saturada ( $P_{sa}$ ) y se pesa la pieza en la balanza ( $P_{bh}$ ). Esta diferencia dividida por la densidad del líquido (agua destilada) será el volumen aparente de la probeta. Se expresa en  $\text{gr}/\text{cm}^3$ .

$$P_e = P_s / \frac{(P_{sa} - P_{bh})}{D}$$

En diagnósticos sobre obra construida, sin embargo, es conveniente conocer no sólo la capacidad de absorción de agua de la piedra en un cierto tiempo, sino el ritmo y velocidad con que lo hace y la capacidad de eliminar el agua absorbida por evaporación. El agua es el vehículo a través del que se producen las lesiones más importantes y el comportamiento hídrico es esencial para un buen diagnóstico de las causas del deterioro. Una fuerte y rápida retención de agua, por ejemplo, combinada con una lenta evaporación, constituyen las condiciones más desfavorables frente a heladas. Adicionalmente, un material de estas características parece poco adecuado para ser limpiado con métodos húmedos, ya que tardará mucho en secarse incrementando los riesgos de sufrir heladas.



Por otro lado, en tratamientos superficiales consolidantes e hidrofugantes, la capacidad de absorción influye decisivamente en el gasto del producto y en la penetración del mismo.

Una lenta evaporación está señalando, a su vez, una porosidad muy fina, de tamaño capilar, de forma que el agua queda retenida en los poros por mecanismos de afinidad eléctrica con las paredes de los mismos. Este efecto se aprecia si existen poros con pequeños diámetros de acceso, de forma que el agua que llegue a introducirse en ellos tendrá muchas dificultades para salir. Cuando existe este tipo de porosidad el material es especialmente sensible al ataque de sales y heladas, ya que en los cristales de sales o hielo que germinen en la fina porosidad no encuentran alivio en su crecimiento si no es rompiendo la pared opuesta del poro que los alberga provocando lesiones en el material.

Para conocer la cinética del proceso de absorción, las probetas de piedra se ponen en contacto con el agua midiendo, cada cierto tiempo, el incremento de peso que experimenta debido al agua absorbida. Este contacto puede efectuarse de varias formas. Cada una de ellas estima una forma determinada de interacción con el agua. Estas son:

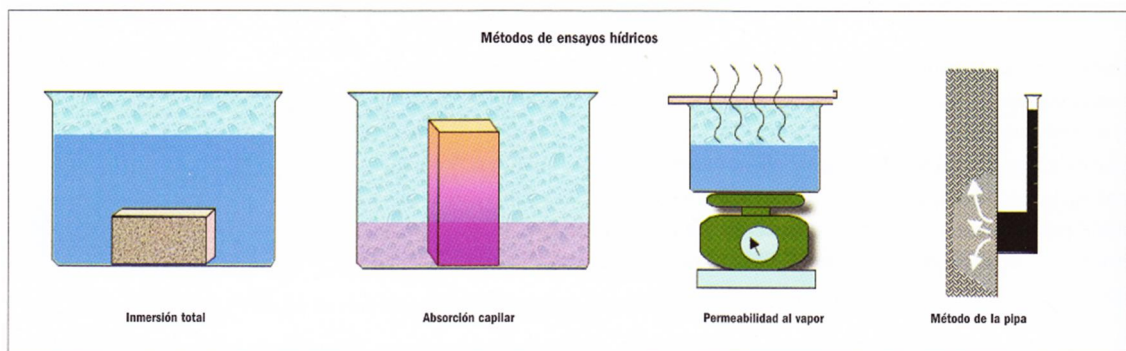


IMAGEN 89. Métodos de ensayos hídricos.

- Absorción y evaporación por inmersión total. Las probetas de piedra son sumergidas completamente. El agua penetra por todas las caras hasta saturar los poros accesibles. Terminado el ensayo de absorción, las probetas se dejan secar a temperatura ambiente. En ambos casos, cada cierto tiempo se estima el peso perdido o ganado, en función del tiempo. Los datos se expresan

gráficamente correspondiendo las abscisas a tiempos y las ordenadas a peso ganado o perdido en porcentaje, obteniéndose un gráfico del ritmo de absorción y otro del ritmo de evaporación. Como la absorción y evaporación son muy rápidas al comienzo, y luego se ralentizan, en abscisas se suele expresar la raíz cuadrada del tiempo, de esta forma se aprecia con mayor detalle el comportamiento de la muestra en los primeros minutos.

Este ensayo permite obtener interesantes conclusiones en orden a establecer parámetros importantes en restauración, tales como velocidad y capacidad de absorción de un tratamiento, tiempo máximo de nebulización de agua si se utiliza este método de limpieza, etc. En el ejemplo del gráfico adjunto se transcriben los resultados del ciclo hídrico estudiado en la calcarenita del Mioceno marino de la zona de Alicante, conocida genéricamente, como piedra de Novelda o Bateig. Se aprecia cómo la piedra absorbe rápidamente agua (a los 15 minutos prácticamente se encuentra saturada), que luego le cuesta mucho eliminar (48 horas). Ello se debe a la existencia de un gran volumen de poros en tamaño capilar donde el agua queda atrapada por fuerzas electrostáticas. Este fenómeno se comprenderá más extensamente al tratar, más adelante en este mismo apartado, el estudio del sistema poroso mediante intrusión de mercurio.

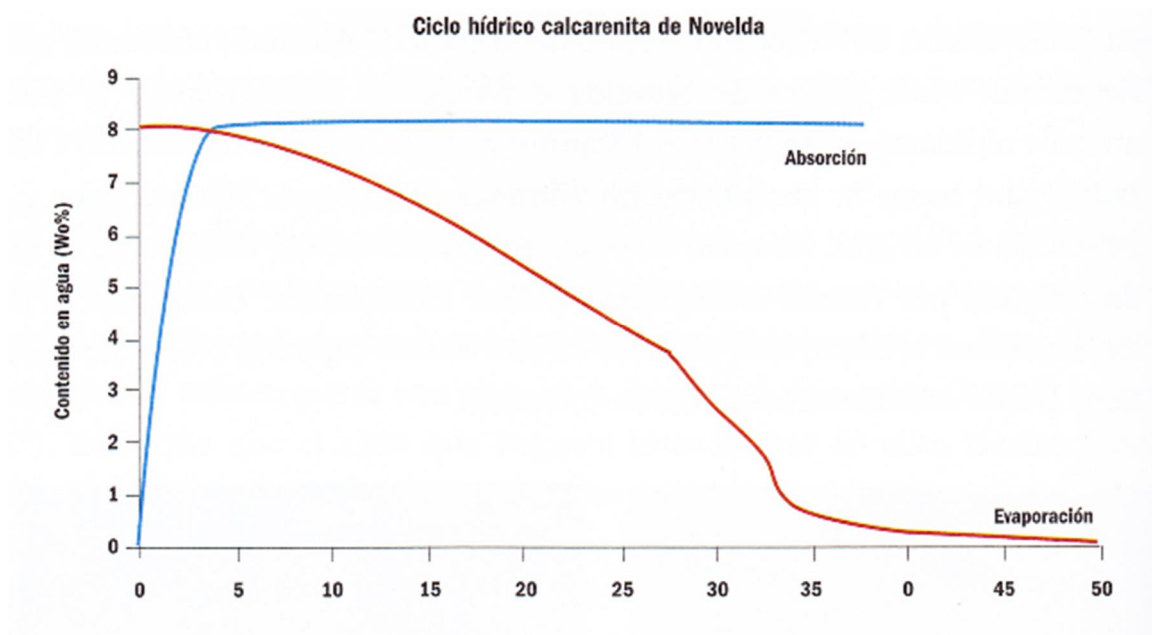


Gráfico 1. Ciclo hídrico de la calcarenita de Novelda. Fuente: J.M García de Miguel, *Tratamiento y conservación de la piedra, el ladrillo y los morteros en monumentos y construcciones*. 2009.

- Absorción capilar. Consiste en sumergir sólo la base de la muestra y estimar bien el incremento de peso relativo, bien la altura que la humedad llega a alcanzar, así como establecer la cinética del proceso mediante la construcción de los correspondientes gráficos, similares a los del ensayo anterior.

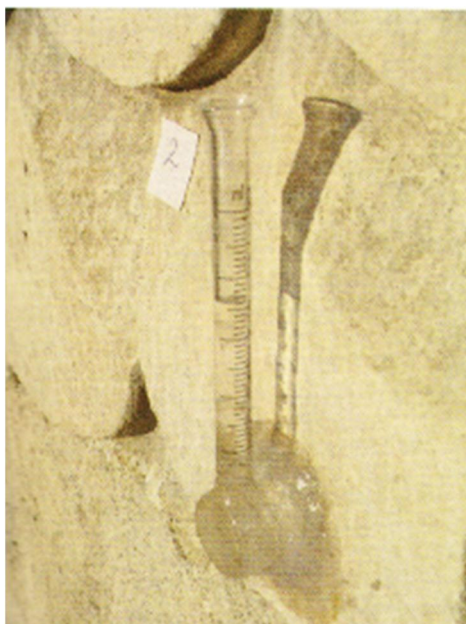


IMAGEN 90. Ensayo de absorción a la pipa.

- Absorción por el método de "la pipa". Se utiliza sobre el propio monumento cuando no es posible extraer probetas, por ejemplo, antes y después de aplicar un tratamiento para estimar la diferencia de comportamiento.

Para llevarlo a cabo se adhiere un tubo acodado, de unos 10 cm de longitud "pipa", sobre la piedra de la propia edificación histórica. Este tubo, una vez lleno de agua, ejerce una presión hidrostática equivalente al

impacto de las precipitaciones sobre el paramento. Cada cierto tiempo (cuando el

agua ha descendido menos de un centímetro) se anota el agua absorbida, determinada mediante el descenso del nivel del líquido en el tubo. Éste se rellena, entonces, hasta alcanzar nuevamente los 10 cm. Con los datos se construye una curva de absorción en función del tiempo o de la raíz cuadrada del tiempo.

- Permeabilidad al vapor de agua. Este ensayo está especialmente indicado cuando se tienen dudas acerca de si un tratamiento permite la transpiración. Consiste en cortar una rodaja de la muestra tratada y adherirla con silicona sobre un recipiente ancho que se ha llenado parcialmente de agua. Si la muestra es permeable tras el tratamiento, el conjunto, recipiente más agua, más muestra, irá perdiendo peso por evaporación del líquido.

## POROSIMETRÍA POR INMERSIÓN DE MERCURIO



IMAGEN 91. Equipo de intrusión-extrusión de mercurio.

Permite conocer no sólo el volumen total de poros, sino también su distribución por tamaños y algo de su morfología. Es una técnica especial para diagnóstico y pronóstico de procesos de degradación. Se trata de un método más preciso, pero más costoso y complejo, que los ensayos hídricos.

El mercurio presenta una baja afinidad electrostática por la superficie de los materiales de construcción, en consecuencia, "no moja" y mantiene una alta resistencia a penetrar en sus poros.

El ensayo se comienza en vacío, aplicando presiones sucesivas, cada vez mayores. Con cada nuevo incremento de la presión, el mercurio es capaz de penetrar en poros de diámetro cada vez menor. El diámetro introducido se relaciona con la presión aplicada mediante la Ley de Jurín:

$$d = \gamma \cos \theta / P$$

Donde:

d: diámetro del poro en micras.

$\gamma$ : tensión superficial liquido-aire.

$\theta$ : ángulo de contacto liquido-sólido.

P: presión ejercida sobre el líquido

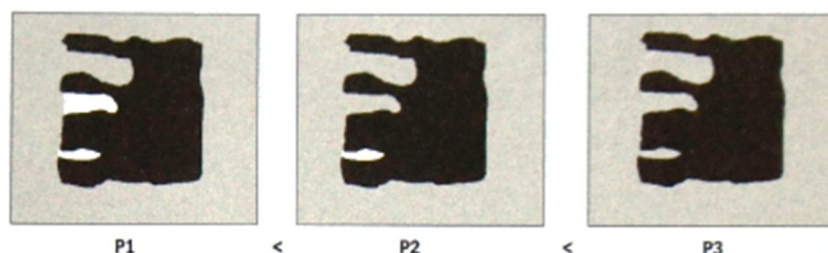


Imagen 92. Con cada incremento de presión el mercurio (punteado fino) penetra en poros de menor diámetro de la muestra (blanco).



El volumen de mercurio penetrado para cada presión se estima por la disminución de la resistencia eléctrica de la muestra y, mediante la Ley de Jurín, suministra el volumen de poros con de ese diámetro.

Al final se obtiene un histograma acumulado del volumen de poros en función del diámetro.

#### PIEDRA DE NOVELDA SIN TRATAR

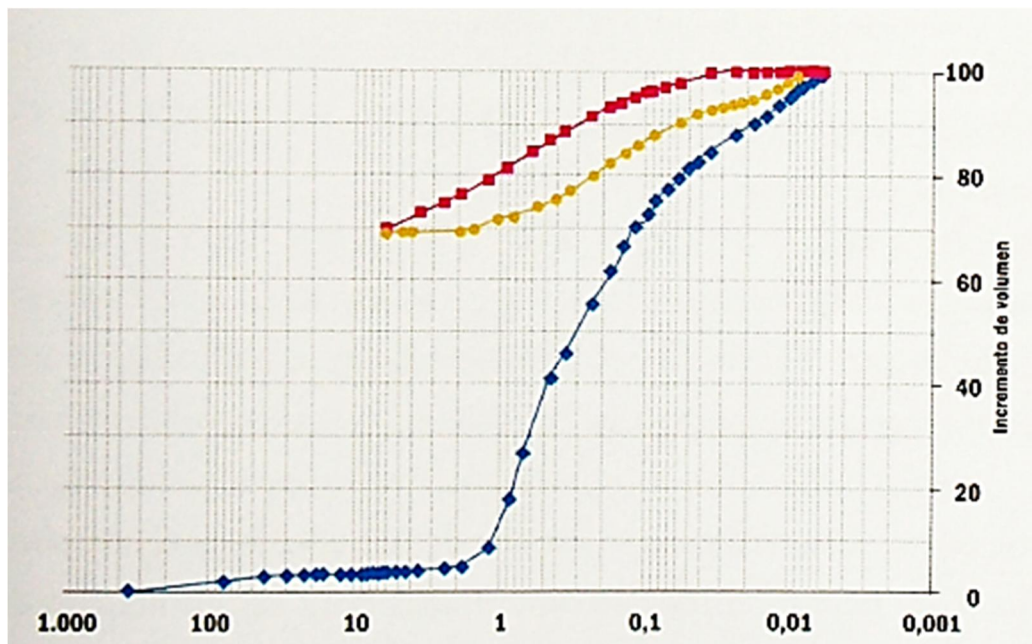


Gráfico 2. Resultado de porosimetría por intrusión de mercurio en una piedra de Novelda sin tratar. J.M García de Miguel, Tratamiento y conservación de la piedra, el ladrillo y los morteros en monumentos y construcciones. 2009.

% acumulado de mercurio en la piedra en función del diámetro de poro.  
Azul: etapa de intrusión con presiones crecientes.

Verde: volumen que va extruyendo al ir descendiendo la presión (obsérvese que parte del mercurio queda atrapado ya que la cantidad extruida es inferior a la intruida).

Rojo: mercurio intruido en la segunda etapa de intrusión (obsérvese que es superior al que intruyó durante el primer ascenso de la presión). Ello se debe a que la primera intrusión rompió los poros de la muestra abriendo una neoporosidad debida al ensayo. La presión de rotura se relaciona con la resistencia a tracción de la piedra en cuestión y puede ser utilizado para estimar indirectamente dicha resistencia.

Sin embargo, si en lugar de la curva acumulada se représenla el histograma normal de distribución de poros (sin más que restar cada valor de volumen acumulado intruido del anterior) se obtiene una visión inmediata de la distribución de los poros por tamaños.

### ENSAYOS DE ALTERACIÓN ACELERADA

Se vienen denominando como "ensayos de alteración acelerada" ciertas agresiones a las que se someten las muestras en el ambiente controlado del laboratorio, con el fin de predecir su comportamiento futuro en obra o investigar las causas de su degradación. Todos estos ensayos parten de la suposición, no comprobada, de que incrementando la agresión se lograrán los mismos resultados en laboratorio, en un menor tiempo, que los que se experimentarían en obra en un tiempo más dilatado. La necesidad de estos ensayos deriva de la imposibilidad operativa de establecer el comportamiento de un determinado material en el ambiente real a que va estar sometido, en un tiempo razonable.

El tipo de ensayo que se realizará depende de las condiciones reales que se espera va a sufrir el material o ha venido sufriendo en obra (por ejemplo, un ensayo de heladicidad será adecuado para material en una edificación en un clima frío, con muchos días de heladas al año). Estos ensayos, aun con las limitaciones que más adelante se discuten, no deberían obviarse, especialmente en obras de gran entidad.

El material en obra suele encontrarse sometido a distintos tipos de agresión simultáneos, por ejemplo, heladas, sales y cambios termohigrométricos. No está demostrado que la resultante de varias agresiones simultáneas sea la suma de agresiones individuales. Más bien, desde un punto de vista teórico, parece lógico que se potencien mutuamente, ocasionando unas lesiones superiores a las que cabría esperar. Por ejemplo un ataque salino puede abrir una porosidad en la piedra que es aprovechada por heladas cuya actuación sería mucho menos lesiva en piedra



sometida a este único factor. Éste es un camino de investigación que está por recorrer.

Aunque existen ensayos normalizados útiles en obra nueva para establecer calidades, cuando se trata de diagnosticar patologías en obra construida donde las agresiones pueden combinarse, puede ser necesario diseñar ensayos específicos que respondan a las preguntas que se plantean acerca de cómo se han originado las lesiones y cómo responderá el material frente a tratamientos en esas condiciones particulares (clima, orientación, posición arquitectónica, etc.). No hay que olvidar que los distintos procesos de alteración pueden reforzarse.

Los ensayos de alteración utilizan ciertos estimadores para determinar la importancia de las lesiones. Los más sencillos son las meras variaciones en aspecto (aparición de fisuras, manchas, hinchamientos, etc.) y la pérdida de peso debida al desprendimiento de granos de la muestra durante el ensayo.

Cuando se trata de diagnosticar procesos en obra construida puede ser conveniente acudir, adicionalmente, a otros estimadores más precisos, por ejemplo, el cambio en las propiedades hídricas o las variaciones en la configuración del sistema poroso.

Aunque los ensayos proporcionan una información interesante, no se debe despreciar la obtenida directamente mediante la observación. La inspección detallada del estado de piedra colocada en época conocida en el propio monumento, o en edificios próximos cronológicamente datados y ubicados en el ambiente más similar posible, suele suministrar información muy útil al respecto. Los ensayos más usuales son los siguientes.

- Resistencia a las heladas. Las probetas se desecan hasta peso constante y luego se sumergen en agua durante un tiempo. Seguidamente se someten a ciclos de hielo-deshielo repitiendo el proceso. El módulo de heladicidad se expresa mediante la pérdida de peso en el ensayo, expresada en porcentaje.

### Resistencia a los cambios térmicos

Las muestras se someten a ciclos de calentamiento-enfriamiento con el fin de valorar las alteraciones superficiales (cambios de color, aparición de oxidaciones, etc.). Cada ciclo comprende la permanencia en una estufa a temperatura elevada, seguida de inmersión en agua a temperatura ambiente. Este ensayo es indicativo para estimar si en la piedra existen minerales que pudieran producir oxidaciones antiestéticas con el tiempo o incluso la fracturación del material por el hinchamiento de dichos minerales.

- Resistencia al ataque salino. La muestra se sumerge en una disolución de sulfato sódico al 12%, de la que luego se extrae para que se seque y las sales cristalicen, completando un ciclo. Las muestras se someten a ciclos repetidos y se examina tanto la pérdida de peso, como las alteraciones sufridas.

- Resistencia a la alteración en atmósfera controlada. Los ensayos se realizan en cámaras apropiadas. Se trata de investigar el comportamiento de los materiales de construcción frente a la contaminación atmosférica.

Hay que señalar, sin embargo, que los resultados del ensayo rara vez reproducen los efectos que se aprecian en los materiales en el ambiente real y que se atribuyen a esta causa. Por ejemplo, se supone que las "costras negras" que aparecen en ambientes urbanos se deben al ataque ácido.

Pues bien, si se somete un granito a una atmósfera con ácido sulfúrico en laboratorio en concentraciones muy superiores a las que existen en nuestras ciudades, no aparecen "costras negras", sino que las probetas suelen presentar un cambio de tono por oxidación árida de los minerales que contienen hierro. La pregunta es entonces: ¿qué más contribuye a la generación de las costras negras? Se ha aducido la presencia de tiobacterias<sup>10</sup>. Quizá el tiempo es importante para su generación.

Un ejemplo es la resistencia en atmósfera de SO<sub>2</sub>, característica aplicable a las rocas ígneas destinadas a exteriores fuertemente contaminados

---

<sup>10</sup> Bacteria que crece bien en presencia de sulfuros y que contienen azufre. Fuente: <http://dicciomed.eusal.es/palabra/tiobacteria>



(combustión de carburantes), que pueden sufrir deterioro por ataque del ácido sulfúrico (lluvia ácida). La pérdida de aspecto se evalúa tras el ensayo contemplado en el proyecto de norma pr EN WI 00246-33

## CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE LA PIEDRA

- Resistencia mecánica a la compresión. Es la carga máxima por unidad de superficie capaz de soportar una probeta hasta que se produzca la rotura. Este ensayo es aconsejable en materiales estructurales.



*IMAGEN 93. Prensa hidráulica utilizada en los ensayos de resistencia mecánica a compresión.*

- Resistencia a la compresión después de la heladicidad. Es el valor a la resistencia a la compresión después de someter a la muestra a ciclos de hielo-deshielo. El módulo de heladicidad se expresa en porcentajes. Es aconsejable para piedra colocada en el exterior.
- Resistencia mecánica a la flexión. Ensayo aconsejable para granitos, mármoles, pizarras y otras piedras ornamentales que van a utilizarse en forma de aplacado sobre anclajes recibiendo el impacto del viento, o baldosas.
- Coeficiente de dilatación lineal térmica. El ensayo se realiza con probetas cilíndricas o prismáticas, montadas en un medidor de expansión con un captador de temperatura, que transforma el desplazamiento mecánico en una señal eléctrica, que puede recogerse en un registrador. El coeficiente de dilatación lineal térmica se mide en mm/m°C. El conocimiento del coeficiente de dilatación térmica puede prevenir los daños ocasionados por

la dilatación de los materiales que sean utilizados en exteriores, en climas caracterizados por sus amplias oscilaciones térmicas, sobre todo en aplacados, donde se deberá prever una junta con material lástico o exenta, suficientemente amplia para absorber la dilatación de las piezas.

- Resistencia al desgaste por rozamiento. Norma UNE 22-183 (Mármoles y calizas) UNE 22-173 (Granitos). La norma antigua consistía en conocer el desgaste lineal, en milímetros, que se producía en las probetas al ser sometidas a un recorrido sobre una pista abrasiva.

Se determinaba cambio de volumen y, a través de él, el desgaste sufrido. Ensayo aconsejable en piedras para pavimentos y solados.

La Norma UNE-EN 1341 sigue, sin embargo, un procedimiento completamente diferente. Mediante esta norma, se determina la anchura de la huella rectangular que deja un disco de diámetro de 200mm y 70mm de ancho, al rozar durante 75 vueltas contra el material a ensayar, utilizándose un abrasivo de corindón blanco.

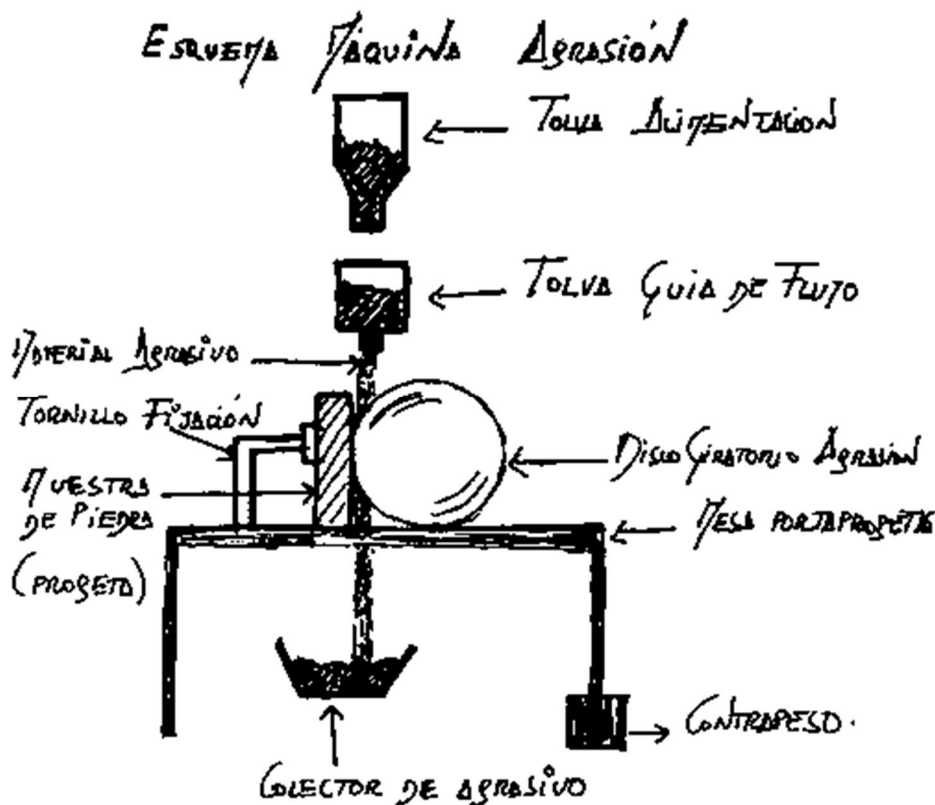


IMAGEN 94. Esquema de ensayo de desgaste por rozamiento.

- Resistencia al impacto. Se colocan las probetas sobre un lecho de arena, dejando caer un peso sobre ellas desde una altura creciente, hasta que se produzca la rotura.

- Microdureza Knoop. Se aplica un penetrador de diamante que incide en varios puntos de la muestra con cierta presión y se establece la relación entre la carga y la huella dejada. Ensayo aconsejable para mármoles y otras piedras ornamentales. La dureza y la resistencia al choque y al desgaste son particularmente útiles para los elementos constituyentes de pavimentos en suelos de escaleras.



IMAGEN 95. Microdurómetro.

- Lápices de Mohs. Para determinar la dureza de una superficie, en este caso de origen pétreo, se utilizan unos lápices especiales calibrados en función de la escala de Mohs. Los lápices están ordenados de menor a mayor dureza de tal manera que el 1 equivaldría al talco y el 10 al diamante.

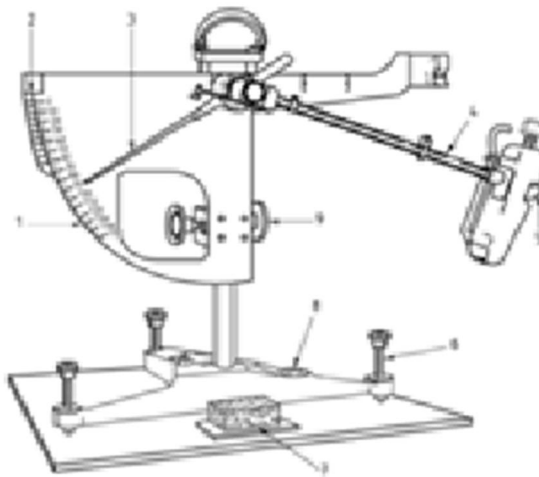


Imagen 96. Lápices de Mohs.

- Resistencia al anclaje. Se utilizan dos probetas secas de 15 x 15 x 3 cm. En el centro de los cuatro catos de cada probeta se realizan orificios cilíndricos de 5 mm de diámetro y 30 mm de profundidad y en ellos se fija un bulón de acero mediante una lechada de cemento. Una vez sujeta la probeta se ejerce sobre cada bulón un esfuerzo normal al eje hasta la rotura de la piedra.

El valor final se expresa en newton (N). Ensayo recomendado en aplacados al aire colgados de rastreles. También es conveniente en refuerzos de estructuras o piezas, mediante anclajes o cosidos.

- Resistencia al deslizamiento. Se obtiene mediante el ensayo del péndulo en base a la norma UNE-ENV 12633:2003, tal como se describe en el Anejo A de la citada norma. Este ensayo consiste en la pérdida de energía de un péndulo normalizado, provisto en su extremo inferior de una zapata de goma, al dejarlo caer desde una posición horizontal, de forma que la zapata roza con una presión determinada sobre la superficie a ensayar y en un recorrido previamente definido. La pérdida de energía se mide en función del ángulo de oscilación del péndulo sobre una escala de valores adimensionales.



*Imagen 97. Péndulo normalizado.*



# CAPITULO III.

## PATOLOGÍAS, ALTERACIONES, DIGNOSIS, TRATAMIENTO Y CONSERVACIÓN.



# CAPITULO III .PATOLOGÍAS, ALTERACIONES, DIGNOSIS, TRATAMIENTO Y CONSERVACIÓN.

## 1. FACTORES DE ALTERACIÓN

Los factores de alteración pueden definirse como aquellos parámetros que son capaces de inducir cambios perjudiciales en ciertas propiedades de la piedra, considerada ésta como elemento de construcción, que se manifiestan en forma de indicadores de alteración, a través de determinados mecanismos.

Los factores de alteración condicionan el comportamiento de la piedra en una obra.

No es posible a la hora de enjuiciar esos factores de alteración considerar a la piedra aisladamente, sino como parte integrante de un edificio. Es cierto que hay factores inherentes al propio material, como son su composición química y mineralógica, pero a la hora de juzgar su grado de alteración, este está condicionado además, y en gran medida, por el ambiente general que le rodea, por su entorno más inmediato y por la función que desempeña dentro del propio edificio.

Así es necesario considerar la posición y orientación de la piedra dentro del mismo, así como la repercusión que en dicho material tiene la propia estructura del edificio.

El resto de los factores extrínsecos de alteración suelen clasificarse, atendiendo a la intervención o no del hombre, en naturales (agua, sales, cambios térmicos, viento, etc.) y antropogénicos (fundamentalmente contaminación atmosférica).

FACTORES INTRÍNSECOS			
Composición química	Composición mineralógica	Características petrográficas	Propiedades físicas
FACTORES QUÍMICO-AMBIENTALES			
Térmicos	Hidráulicos	Viento	Composición del aire
Presencia de sales	Contaminación atmosférica		
	Anhidrido sulfuroso	Anhidrido carbónico	Óxidos de nitrógeno
	Compuestos orgánicos	Amoniaco	Aerosoles
FACTORES BIOLÓGICOS	FACTORES DE TENSIÓN	FACTORES DE INCOMPATIBILIDAD	FACTORES DE USO

Tabla 7. Factores de alteración de la piedra. Fuente: M Alcalde Moreno, R. Villegas Sánchez, J.F Vale, *Diagnosis y tratamiento de la piedra*. 1990.

## 1.1. Factores intrínsecos

Los factores intrínsecos que afectan a la durabilidad de los materiales rocosos dependen de las características petrográficas de las piedras, es decir, de la mineralogía, la textura y la composición química de estos materiales.

Asimismo, la durabilidad también se encuentra condicionada por ciertas propiedades físicas que presentan las piedras, entre las que se deben destacar la porosidad y configuración del sistema poroso, la superficie específica y las propiedades hídricas, que están relacionadas con el movimiento de fluidos al interior del material.

Las degradaciones intrínsecas se relacionan con una cantidad de reacciones endógenas que experimentan los distintos minerales de los que se componen las rocas. Las reacciones mencionadas pueden ser de carácter químico o petrográfico y se pueden verificar sin excepción, con el paso del tiempo.

Es decir, que si bien se considera en general a las piedras como un material perdurable, éstas están también sujetas al proceso evolutivo, lo que quiere decir que tras un período de eficacia, culminarán en un estado de desintegración.

Dentro de los factores intrínsecos de alteración de los materiales pétreos, se pueden mencionar a las degradaciones producidas por:

- COMPUESTOS DE ÓXIDO DE HIERRO
- COMPUESTOS PIRITOSOS
- PROCESOS DE CAOLINIZACIÓN Y CLORITIZACIÓN

### DEGRADACIONES INTERNAS POR COMPUESTOS DE ÓXIDO DE HIERRO

En general, en el seno de los mármoles, piedras calizas y con frecuencia en areniscas y pizarras se pueden encontrar componentes de óxido de hierro.

Al tener una preferencia por la humedad del medio ambiente, se transforman en un mineral denominado *goetita* que es un óxido de hierro hidratado. Lo que se observa es un proceso de aumento de volumen, que puede llegar a generar fisuras y grietas, localizadas en el mismo lugar del asentamiento de los compuestos ferruginosos. Esta topoquímica o acción puntual incrementa la degradación de material.



IMAGEN 98. Mármol con presencia de óxidos de hierro formando venas.

La *goetita* tiene una composición de gel que retiene el agua absorbida, lo que le permite un desplazamiento no muy rápido a través del sistema de poros de la piedra. De esta manera, el

resultado son zonas de tonos rojizos separados de los núcleos originales del hierro, con formas arbitrarias.

### DEGRADACIONES INTERNAS POR COMPUESTOS PIRITOSOS

En lugares muy puntuales y localizados de las areniscas, calizas, mármoles, pizarras y muy raramente en los granitos, es donde se pueden encontrar a las piritas o sulfuros de hierro.

Cuando se expone a estos minerales al medio ambiente experimentan un proceso de oxidación e hidratación, con la consiguiente formación de óxido de Hierro y ácido sulfúrico.

El resultado de esta reacción es un aumento considerable de volumen por oxidación de hierro, formación de “orín o herrumbre” y alteraciones de tonalidad que viran a colores ocres o rojizos.



Si se trata de calizas y mármoles, este tipo de ácido provoca acciones agresivas de consideración. En las piedras areniscas ataca con preferencia a las matrices carbonatadas y las pizarras resultan en una disgregación total.

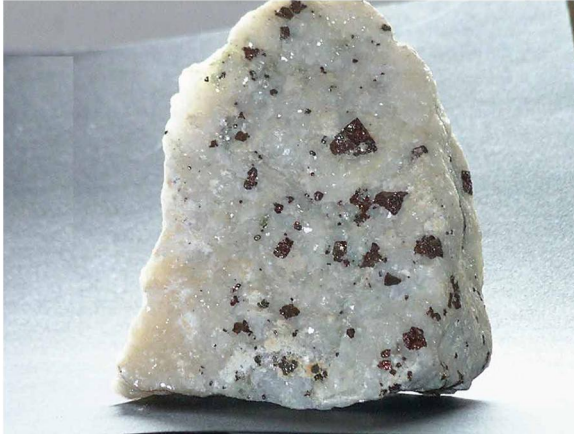


IMAGEN 99. Mármol de Macael con restos de piritas.

Con el tiempo, el óxido de hierro evoluciona, capta humedad del ambiente y se convierte en el óxido de hierro hidratado mencionado anteriormente: *goetita*.

### DEGRADACIONES INTERNAS POR CAOLINIZACIÓN Y CLORITIZACIÓN (REACCIONES DE HIDRÓLISIS)

Estos procesos de degradación suceden en aquellas rocas que están compuestas por feldespato y micas, especialmente las de tipo granítico.

También se pueden observar estos procesos de alteración en las rocas areniscas que contienen feldespatos o en las rocas pizarras con altos contenidos de micas (micacitas). Gracias a la acción de los compuestos ácidos que se encuentran en la atmósfera, el proceso de caolinización disgrega a los feldespatos y los fragmenta en partículas pequeñas, lo que se conoce como ARENIZACIÓN DE LOS GRANITOS.

Si los feldespatos contienen hierro se obtienen arcillas de colores rojizos, pero si solamente contienen aluminio se verán arcillas blancas denominadas CAOLÍN.



IMAGEN 100. Caolín.

El proceso de cloritización solamente afecta a las micas, que liberan óxido de hierro de forma lenta hasta que se transforma en *goetita*, compuesto citado con anterioridad.

## 1.2. Factores químico ambientales

El agua es un agente de alteración de los materiales rocosos fundamental. La fuerza que ejerce se basa en su poder de disolución.

La resistencia de todo material pétreo resulta afectada cuando partes de su estructura se disuelven.

Debido a que muchos materiales son heterogéneos, las partículas de la superficie no tienen la misma solubilidad. Entonces, el agua penetra en diferentes puntos hasta distintas profundidades, lo que resulta en superficies que se hacen paulatinamente desiguales y cada vez más corroídas.

Una vez que las partículas más solubles son eliminadas por disolución, los salientes que quedan en la superficie desigual pierden estabilidad y cohesión, destruyéndose a lo largo del tiempo. Pero la capacidad de disolución del agua se intensifica porque casi siempre tiene adiciones de carácter ácido. Los gases ácidos contribuyen con la reacción del material, siendo especialmente importante en las



rocas carbonatadas. Estas adiciones ácidas se encuentran en el aire en forma de dióxido de carbono, óxidos de nitrógeno, etcétera., compuestos ácidos que se incrementan en áreas de intensa polución.

En las zonas industriales y urbanas, los procesos de alteraciones de las piedras están estrechamente relacionados con la contaminación atmosférica. A mediados del siglo XX, se agudizó un proceso en gran medida universal: las migraciones de las áreas rurales, originando y acentuando las grandes concentraciones urbanas alrededor de los diversos polos industriales y administrativos.

Este hecho provocó que aumentaran drásticamente las necesidades de movilidad y el consumo energético. Desde ese momento se ve cada vez más incrementada la cantidad de óxidos del carbono, azufre, nitrógeno en el aire, como también aumenta la presencia de aerosoles que modifican la composición porcentual de lo que se puede denominar "aire puro".

Es de esta manera que la mayoría de los contaminantes presentes en el aire tienen su origen en la combustión de combustibles fósiles, tales como el carbón, el petróleo y el gas natural.

Por otro lado, los depósitos de materias en forma de partículas actúan ennegreciendo las piedras, favoreciendo la oxidación del dióxido de azufre a sulfato y el posterior ataque químico de éste a la piedra.

La acción de los contaminantes se puede relacionar con la deposición de gases ácidos y de material en forma de partículas, sobre la superficie de las piedras. Se pueden considerar como algunos de los contaminantes atmosféricos más importantes a los compuestos de azufre y de nitrógeno, a los óxidos de carbono, a los cloruros y fluoruros, a los compuestos orgánicos volátiles y a las partículas sólidas.

Los gases anteriormente mencionados ascienden hasta las capas más altas de la atmósfera y allí reaccionan liberando compuestos de peso específico más alto que el del aire. Luego descienden disueltos en el agua de lluvia, como ácidos que se depositan en las plantas y en las construcciones. Este hecho desencadena diferentes acciones deteriorantes de los materiales pétreos.

De todas maneras, no hay que presuponer que la polución es el único responsable de todos los problemas que afectan a las piedras. Si esto fuera así no se podría explicar la degradación de los materiales pétreos ubicados en las zonas rurales,

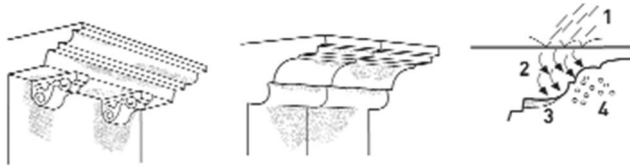


IMAGEN 101. Formación de costras y ennegrecimientos en zonas protegidas.

alejados de las fuentes de contaminación humana.

Por ese motivo, los contaminantes atmosféricos también encuentran su origen

en causas naturales, como son las emanaciones y las erupciones volcánicas, los incendios forestales y también la putrefacción de materia orgánica.

Las causas ambientales químicas que se consideran más importantes son las acciones de:

- ÓXIDOS DE AZUFRE
- ÓXIDOS DE CARBONO
- ÓXIDOS DE NITRÓGENO Y DE COMPUESTOS DE NITRÓGENO
- CLORUROS Y FLUORUROS
- COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES
- PARTÍCULAS SÓLIDA
- CRISTALIZACIÓN/HIDRATACIÓN DE SALES SOLUBLES

### ACCIÓN DE LOS ÓXIDOS DE AZUFRE

Este tipo de óxido procede en general de la combustión de productos que presentan compuestos de azufre, es decir, combustibles fósiles. Evidentemente, se encuentran mayor número de casos de degradación pétreo por acción de estos óxidos en las zonas urbanas e industriales. Este es uno de los factores que afecta con mayor profundidad a las piedras.

Una vez que el dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) está en el aire se oxida rápidamente ( $\text{SO}_3$ ) y así, combinado con la humedad presente en el ambiente, surgen una serie de sulfatos que alteran las piedras en forma muy contundente. Uno de estos sulfatos es el yeso.

Cuando se forma yeso se produce un incremento de volumen muy importante, que crea costras sulfatadas y favorece las DESCAMACIONES, las DESPLACACIONES y otras formas de deterioro. Si el agua de lluvia limpia la superficie de las piedras atacadas, éstas permanecerán limpias, aunque manifestando una superficie áspera. En el caso de las piedras que no pueden limpiarse con el agua de lluvia pero que se humedecen de una manera intermitente por la aportación de agua de cualquier otro origen, se formará una capa dura e impermeable de sulfato cálcico (yeso). La capa formada, eventualmente puede provocar la formación de AMPOLLAS o influir en la EXFOLIACIÓN de la superficie.

Algunas piedras arenosas son proclives a generar con facilidad en su parte exterior ESCAMAS y COSTRAS que, al tener sus poros tapados por el yeso, se desprenden en caras paralelas a la superficie original de la piedra.

Es principalmente a través de dos vías que se realiza la acción de dióxido de azufre en la piedra: la vía seca y la vía húmeda. En el caso de la vía de deposición seca, el dióxido de azufre llega a la superficie de la piedra en forma de gas.





Cuando contacta con el carbonato cálcico se produce una reacción que da origen al sulfito cálcico, que en presencia de catalizadores y agua se convertirá en sulfato cálcico (yeso).

El otro tipo de deposición, la vía húmeda, es la más común. Allí el dióxido de azufre se oxida en la atmósfera (se disuelve en las gotas de agua de nieblas y nubes) o en la misma superficie del material pétreo (durante la condensación de vapor de agua).

Ya sea que se trate de la vía húmeda o de la vía seca, el ataque a la roca se realiza a través del ácido sulfúrico diluido. Un dato a tener en cuenta es que si la acción del ácido sulfúrico es evidente en las piedras que están constituidas por carbonatos, no es tan clara en las piedras arenosas formadas por cuarzos.

#### ACCIÓN DE LOS ÓXIDOS DE CARBONO

El dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) es un elemento que se encuentra siempre presente en la atmósfera y es uno de sus componentes naturales, aunque en pequeñas cantidades. Estas medidas se ven incrementadas notablemente en las áreas industriales y urbanas. Su concentración normal media es de 340 ppm, y ha llegado a crecer en los últimos decenios en áreas urbanas hasta un 0,3 %. El aumento es resultado, fundamentalmente, de la combustión de fósiles.

El monóxido de carbono (CO) no supone un grave peligro para las rocas, y la mayor parte de CO que existe en el aire se debe a causas naturales, como son las erupciones, las emanaciones volcánicas y las acciones de bacterias. El problema es que el CO se oxida normalmente a  $\text{CO}_2$ . Este gas, disuelto en el agua de lluvia, reacciona con los minerales que aparecen comúnmente en las piedras que son utilizadas para la construcción. Los efectos negativos del  $\text{CO}_2$ , se asocian con los materiales calcáreos, ya que en presencia de agua llegan a disolver a los carbonatos constituyentes de dichas piedras.

El dióxido de carbono disuelto ataca los feldespatos y otros silicatos, convirtiéndolos en minerales arcillosos, mediante un proceso de meteorización, que se conoce con el nombre de CAOLINIZACIÓN.

Estas acciones causan una desintegración superficial constante en algunas piedras eruptivas y, especialmente, en las piedras calcáreas y en las arenosas con cemento calcáreo, cuando se ven expuestas a la lluvia. Se conoce este mecanismo como DISOLUCIÓN.

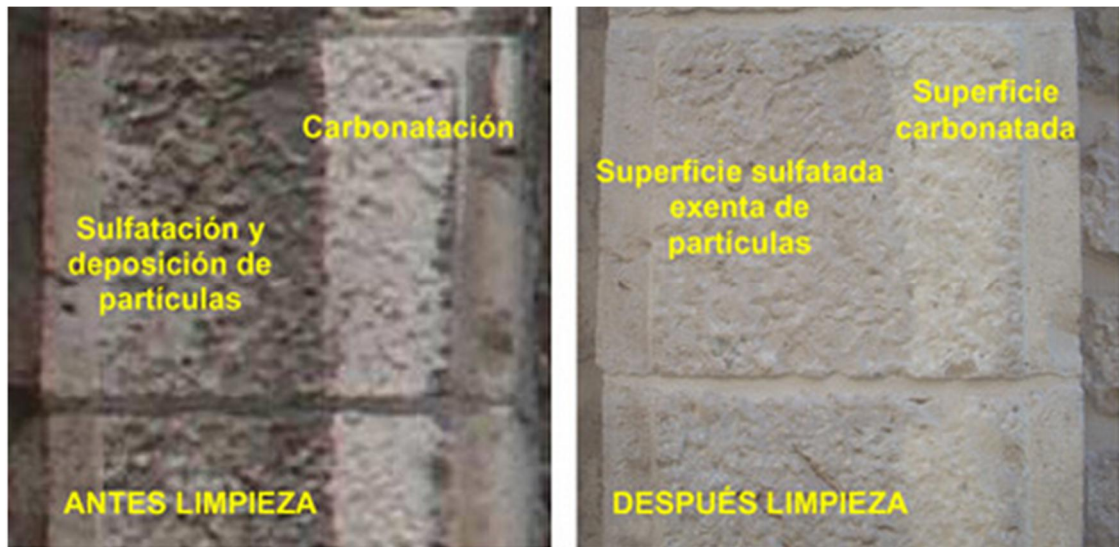


IMAGEN 102. Ensuciamiento producido por carbonatación y sulfatación. Antes y después.

### ACCIÓN DE LOS ÓXIDOS DE NITRÓGENO Y COMPUESTOS DE NITRÓGENO

En épocas recientes, se comenzó a otorgar cada vez más importancia al papel destructivo de los óxidos de nitrógeno, presentes en las atmósferas contaminadas. Los óxidos de nitrógeno proceden, en su mayoría, de los fertilizantes nitrogenados y de los combustibles de los automóviles.

El  $\text{NO}_x$  puede generar depósitos en la superficie de las rocas. Es en la conversión fotoquímica de los  $\text{NO}_x$  en ácido nítrico donde se esconde el proceso más dañino para las piedras. Las piedras carbonatadas son muy sensibles a la acción de estos contaminantes carbonatados.



### ACCIÓN DE CLORUROS Y FLUORUROS

La naturaleza es la fuente de los productos clorurados que se encuentran en la atmósfera. Surgen de los mares, de los volcanes, de los desiertos; pero también gracias a la actividad humana. Los hombres, con sus plantas de fabricación de HCl (cloruro de hidrógeno), de elaboración de plásticos y papel con cloro potencian el incremento de los productos clorurados en el medio ambiente.

La acción de estos químicos se puede ver cuando, a través del ácido clorhídrico, atacan a las piedras calizas, a los mármoles y a las areniscas con cemento calcáreo. El ácido clorhídrico actúa disolviendo el material carbonatado y formando sales higroscópicas que favorecen importantes deterioros.

Entre los deterioros que produce están la ALVEOLIZACIÓN y la DESAGREGACIÓN ARENOSA.

Los compuestos con presencia de fluoruro tienen una fuerte acción agresora, pero no es tan importante su presencia cuantitativa en la atmósfera.

De esta manera, su acción sobre las piedras es relativamente escasa. Los compuestos fluorados provienen, en general, de actividades industriales como la fabricación de fertilizantes, de acero, aluminio, vidrio, etc. El Flúor, al ser altamente reactivo, se convierte de manera fácil en Hidróxido de Flúor. Éste ataca a las piedras calizas y genera fluoruro cálcico, que tiene menor volumen que la calcita, con lo que tiende a aumentar la porosidad del material. Las rocas silíceas también se ven afectadas, lo que origina nuevas fases minerales.

### ACCIÓN DE LOS COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES

La mayoría de los compuestos orgánicos volátiles provienen de combustibles utilizados por los medios de transporte y locomoción, especialmente los hidrocarburos de diferentes tipos, como los alkanos, alquenos y aromáticos.



Evidentemente, existe mayor presencia de compuestos orgánicos volátiles en las áreas urbanas e industrializadas. La acción de los compuestos orgánicos volátiles sobre las piedras contribuye a su ennegrecimiento y a la formación de COSTRAS y de PÁTINAS NEGRAS.

### ACCIÓN DE LAS PARTÍCULAS SÓLIDAS

El polvo, las cenizas volantes, el hollín, los aerosoles salinos, se encuentran en el aire como partículas sólidas y en diferentes concentraciones. Su tamaño es variable y pueden oscilar entre los 0,001 a 100 micras de diámetro.

Presentan formas muy diversas, ya que pueden ser esféricas, huecas, macizas, horadadas, irregulares. Asimismo, la composición de las partículas sólidas incluye partículas metálicas, partículas carbonosas, partículas sulfuradas y partículas carbonatadas. Cuando este material se sedimenta sobre la superficie de las piedras, contribuye en su ENSUCIAMIENTO.

Además, y gracias a su gran superficie específica, tiende a aumentar la humedad de los materiales rocosos. Esta acción se da cuando las partículas absorben vapor de agua atmosférico, facilitando reacciones de las piedras con los contaminantes, por su efecto catalizador en la oxidación del dióxido de azufre a sulfato.

La medida del ennegrecimiento que la sedimentación de este material particulado genera está determinada por la variación de reflectancia de la superficie. La porosidad y la rugosidad superficial son dos de las características de la superficie del material rocoso que favorecen el depósito de partículas.

Las piedras generan, por la acción de la contaminación, una serie de productos secundarios, cuyo resultado más frecuente son las sales solubles. Las sales solubles más importantes son los sulfatos, nitratos y cloruros.



### ACCIÓN DE LA CRISTALIZACIÓN / HIDRATACIÓN DE SALES SOLUBLES

La cristalización de las sales solubles es el proceso más importante en lo que refiere a alteraciones de material rocoso. La intensidad del daño que causan las sales solubles a las piedras es variable y depende tanto de las características de la sal como de las condiciones ambientales que controlan los mecanismos de disolución y precipitación.

Las sales solubles pueden tener diversas procedencias. Su fuente más común es la externa: el suelo, los materiales de construcción, los aerosoles atmosféricos o marinos. Se esquematiza normalmente el origen de las sales solubles de la siguiente manera:

- EN UN AMBIENTE CONTAMINADO, UNA ATMÓSFERA ÁCIDA PUEDE ATACAR A LA PIEDRA. Así, los carbonatos de calcio se transformarán en yeso en las rocas carbonatadas. Los feldespatos hidrolizados en ese medio ácido liberarán álcalis y calcio que junto con los iones sulfato producen sales solubles.
- LA PIEDRA PUEDE TENER ORIGINALMENTE UN CONTENIDO DE SALES SOLUBLES. Esa composición se relaciona con la cantera de donde se extraen los materiales pétreos, que pueden albergar yacimientos salinos.
- LOS MATERIALES UTILIZADOS EN RESTAURACIONES ANTERIORES Y EN LA CONFECCIÓN DE MORTEROS PUEDEN SER PORTADORES DE CONTENIDO EN SALES SOLUBLES.(especialmente importante es el cemento de Pórtland). Si los tratamientos de restauración no fueron lo suficientemente cuidadosos, pueden aportar compuestos de sales solubles. Los tratamientos que las generan son las limpiezas ácidas o alcalinas, los detergentes iónicos, ciertos consolidantes e hidrofugantes, etc.





- EL AGUA ARRASTRA SALES SOLUBLES CUANDO ASCIENDE POR CAPILARIDAD DESDE EL SUELO. Estas sales proceden de los abonos, de los ácidos húmicos, de los tratamientos contra plagas, de las salmueras antihielo, de la orina o de los excrementos.
- LOS ESTUCOS ANTIGUOS pueden aportar yeso, y las ARGAMASAS que fueron realizadas con cales magnesianas pueden aportar magnesio, que junto a los contaminantes producen sales solubles.



*IMAGEN 104. El claustro de San Juan de Duero en Soria inundado por la elevación del nivel freático durante un periodo de precipitaciones abundantes. En esta situación, la parte inferior de las arcadas permanece húmeda hasta una determinada altura dependiendo del proceso de ascensión capilar.*



*IMAGEN 103. Deterioro en las zonas inferiores de las columnas, en la que se observa una zona inferior permanentemente húmeda y afectada por el biodeterioro; una zona intermedia de máximo deterioro de la piedra ocasionado por la cristalización de sale; y una zona superior seca no afectada por la ascensión por capilar de la humedad del subsuelo.*



IMAGEN 105. Cartografía de distribución de contenido en sales de la puerta sur este del Claustro de San Juan.

La presencia de las sales en las piedras, ya sean de origen en la cantera o debida a su incorporación durante el transporte hasta el taller, es casi inevitable.

Además, esta presencia es difícilmente detectable a ojo y sin la ayuda de análisis químicos. Las sales que se encuentran en la arena y en los aglomerantes de mortero son más fáciles de controlar, ya que aparecen en la superficie de las piedras que están unidas por esos morteros.

Pero sea cual sea su origen, las sales solubles que están disueltas en la humedad que se encuentra en el sistema poroso de la piedra se cristalizan mediante el proceso de evaporación del agua. La evaporación se suele producir desde la superficie de la piedra hacia el interior de la misma. Si la temperatura es baja, la evaporación tiene lugar en la superficie de las piedras y los depósitos cristalizados toman la forma de *EFLORESCENCIAS*, *COSTRAS* y/o *PÁTINAS*, según la naturaleza de las sales.



IMAGEN 107. Costras negras por cristalización de sales.



IMAGEN 106. Eflorescencias por cristalización de sales.



Si la temperatura es más alta, la evaporación es más rápida y comienza por debajo de la superficie de la piedra. Las sales se depositan en el interior en forma SUBEFLORESCENCIAS.

Estas subeflorescencias, al principio, se encuentran hidratadas. Pero en determinadas condiciones de temperatura y humedad se pueden transformar en anhídridos que, al encontrarse con un nuevo incremento de la humedad ambiental, incorporan moléculas de agua al circuito, con la consecuente expansión volumétrica y presión sobre las paredes de los poros.

Por otro lado, como resultado de la cristalización, los poros finos se tapan y los gruesos quedan obstruidos parcialmente. El resultado de este proceso provoca un incremento de la compacidad de la superficie de la piedra, formando una COSTRA endurecida.

La zona inmediata, más interna, al haber perdido las sales que se han disuelto, se vuelve más débil y presenta una consistencia arenosa que favorece el desprendimiento de la capa exterior en forma de costra.

Este tipo de costra posee aristas vivas, copia la forma de la superficie y presenta fractura concoidal que ofrece mayor grosor en el centro que en los bordes.

Existe otro proceso que merece ser mencionado. Si las sales se mueven al exterior constantemente y el sentido del fluir del agua es único (de adentro hacia fuera) y las sales son poco solubles y la lluvia no limpia muy seguido la superficie, entonces se forma una capa resistente y bien adherida, que se conoce con el nombre genérico de COSTRA EXTERNA.

Esta capa contiene, más allá de las sustancias disueltas de la piedra, muchas otras sustancias que fueron depositadas por el aire. De hecho, incluye carbonatos, sulfatos, cenizas carbonosas y, a veces, silicio.

Esta costra externa puede ser blanca o gris en zonas rurales o pueblos alejados, pero en las grandes ciudades y en las zonas industriales es negra como resultado del hollín del aire contaminado.



Las sales más peligrosas y destructivas son los sulfatos, sobre todo los de sodio y magnesio. El yeso puede formar costras endurecidas en la superficie de los materiales pétreos y admite varios estados de hidratación.

La acción de los cloruros es predominantemente química, y por ser higroscópicos son muy móviles. El efecto suele ser la ALVEOLIZACIÓN y la ARENIZACIÓN de la piedra.

En la costa, se suma el hecho de que los cloruros pueden proceder de aerosoles marinos. Además de la cristalización e hidratación de sales solubles, existen otros mecanismos que deterioran las piedras, como los cambios estructurales en la sal.



IMAGEN 109. Detalles de zonas alveolizadas correspondientes a la torre derecha y a una de las columnas de la entrada de la Colegiata de Revillagigedo, Gijón.

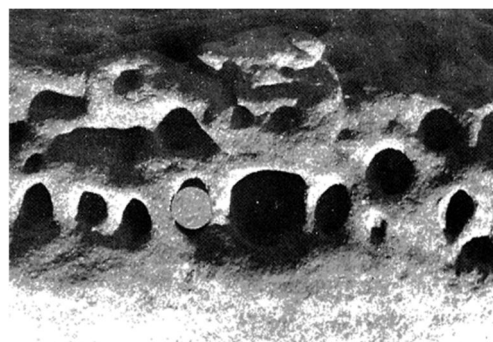


IMAGEN 108. Alveolización por cristalización de sales, Colegiata de Revillagigedo.



IMAGEN 110. Colegiata de Revillagigedo. Gijón después de su restauración.

A continuación estudiaremos los factores únicamente ambientales.

### 1.3. Factores ambientales

#### ACCIONES PRODUCIDAS POR LOS CICLOS DEL HIELO

El hielo es un agente de agresión física para los materiales rocosos muy importante. La transformación total o parcial en hielo del agua contenida en el interior de poros y fisuras de las piedras, implica un incremento de volumen notable.

El volumen específico del hielo (el espacio que ocupa por unidad de masa) a 0 °C es de 1,089; lo que implica un incremento de volumen del 9%.

Este incremento de volumen que experimenta el agua al helarse origina tensiones y presiones internas en las paredes y poros de las piedras.

Esas presiones llegan a unos 500 kg/cm<sup>2</sup>, si la congelación es brusca a -5 °C, y van acompañadas de alargamientos longitudinales del orden de los 0,3 mm/m, por lo que son superiores a los alargamientos de rotura de las rocas que son del orden de los 0,2 mm/m.





Los daños que provienen de este fenómeno tienen mayor o menor importancia según el clima. Simultáneamente, son más intensos cuanto más frecuentes son las oscilaciones térmicas respecto de los 0 °C.

Las temperaturas que se mantienen por sobre los 0 °C durante varios días producen, por lo tanto, el mismo efecto que una helada corta. Esta acción puede llegar a ser bastante intensa en aquellos climas fríos que presentan frecuentes heladas nocturnas, especialmente si el clima es también húmedo.

Los daños que produce el fenómeno de congelación se relacionan directamente con el tamaño del diámetro de los poros. Esto justifica que estructuras de poros grandes no resulten afectadas por la congelación del agua en el interior de ellos y que, por otro lado, estructuras menos porosas pero de menor diámetro de poros sí resulten afectadas.

Esto es así debido a que la acción destructora del hielo se manifiesta sólo en el caso de que el incremento del volumen del agua al congelarse no encuentre suficiente espacio.

Es decir, el hielo es dañino cuando todos los poros de la zona afectada se encuentran llenos hasta el 9/10 de su volumen. Así, las piedras se pueden calificar en "heladizas" (cuando su coeficiente de saturación es superior a 0,9), "poco seguras" (cuando su coeficiente de saturación se encuentra entre 0,8 y 0,9) y "no heladizas" (cuando su coeficiente de saturación es inferior a 0,8).

Existen estudios que concluyen que la resistencia al hielo depende de la cantidad de agua susceptible de helarse, pero también de la estructura de la red capilar y de la distribución, dimensiones y formas de los poros que son constitutivos del material pétreo.

La heladicidad o vulnerabilidad de la piedra al hielo está en relación constante con el tamaño de los poros y con el grado de conexión y continuidad de los mismos, es decir, con su tortuosidad.

El mecanismo se podría describir como sigue: los cristales comienzan a desarrollarse en los poros de mayor tamaño y en las fracturas de la piedra.



Durante este proceso se alimentan por succión capilar a partir de agua que se encuentra contenida en los capilares que los comunican. Cuando se han llenado estos espacios, y si aún queda líquido, la congelación precedente crea la presión necesaria para la formación de cristales de hielo en los huecos pequeños.

Este mecanismo es independiente del incremento de volumen concomitante a la congelación. Para que los efectos del hielo se vean de forma notoria, la porosidad de la piedra debe ser importante, por ejemplo, superior al 5%.



IMAGEN 111. Pináculo de caliza del Patio trilingüe del Colegio de San Ildefonso en Alcalá de Henares, una vez restaurado.



IMAGEN 112. Pináculo de caliza del patio trilingüe del Colegio de San Ildefonso, dañado por heladas.



*IMAGEN 113. Alteración diferencial frente a heladas entre el granito y una caliza compacta en un pavimento exterior, situado en la Universidad de Burgos.*

### ACCIONES PRODUCIDAS POR TENSIONES DEBIDAS A CAMBIOS TÉRMICOS

Los materiales pétreos poseen gran inercia y conductividad térmica. Estas características provocan que, en situaciones de gran amplitud térmica, las piedras sufran tensiones diferenciales entre la superficie y el núcleo. Las tensiones internas resultantes son capaces de producir MICROFISURAS y DESCOHESIONES en el material rocoso.

La materialización de los cambios térmicos se da en acciones mecánicas de cambios de volumen. Esos cambios son consecuencia de las dilataciones y las contracciones del material que se expone a cambios de temperaturas. Los movimientos cíclicos de estos cambios de temperatura pueden llegar a originar roturas en las rocas.

Un segundo mecanismo producido por las variaciones térmicas es el que provocan los carbonatos, el componente fundamental de las piedras calizas y calcarenitas. Los carbonatos son fuertemente anisótropos, y esto resulta en coeficientes de dilatación térmica diferentes según la orientación.

Los dos mecanismos en combinación se ven clara mente en las construcciones que combinan lugares sombreados y soleados, así como entre las capas profundas y las



superficiales. La razón es que se producen diferentes movimientos térmicos entre unas y otras zonas como consecuencia de dilataciones diferenciales.

Sin embargo, con excepción de los climas tropicales y desérticos, la acción de la temperatura es fundamentalmente indirecta, ya que modifica la humedad contenida en los poros de las rocas y la solubilidad de las sales y los gases, lo que acelera las reacciones químicas y facilita la hidrólisis. Las acciones de los cambios bruscos de temperatura también se pueden ver en los edificios incendiados.

De todas maneras, las piedras son muy estables frente a las variaciones lentas de la temperatura. Los diferentes coeficientes de dilación de sus materiales constitutivos son, generalmente, muy pequeños.

Sin embargo, después de producirse una expansión fuerte (por ejemplo un incendio), no se produce una contracción equivalente, por lo que queda una deformación permanente que puede provocar, de no haber juntas de dilatación suficientes, curvaturas y torcimientos de placas.



*IMAGEN 114. Fisura producida por bruscos cambios térmicos, en una estatua de la Catedral de Burgos.*

## ACCIONES DE EROSIÓN DEBIDAS A PARTÍCULAS LLEVADAS POR EL VIENTO

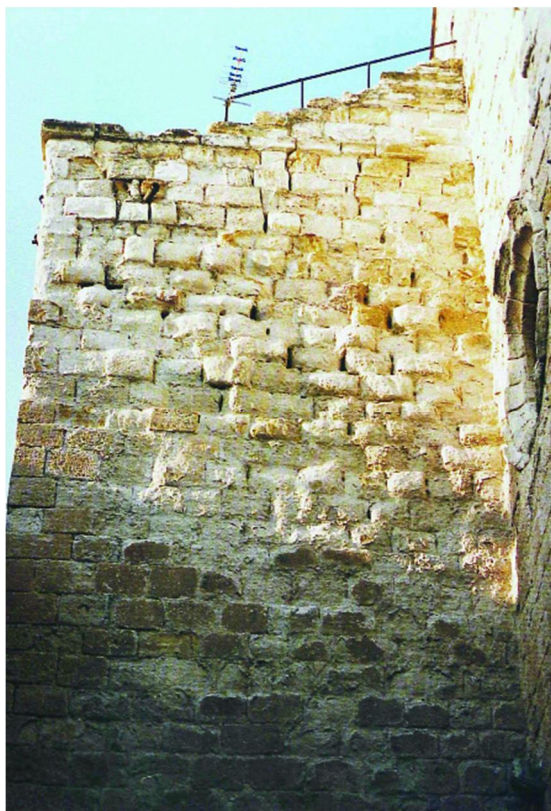


IMAGEN 115. Erosión eólica sobre hiladas superiores en muro de piedra.

La acción del viento es puramente mecánica. El viento puede llevar consigo partículas sólidas, que ejercen un impacto sobre las superficies rocosas, produciendo su EROSIÓN, ABRASIÓN o DESGASTE.

El efecto del impacto está en relación con la energía cinética de la partícula, que a su vez depende del tamaño y densidad de la misma, como también de su velocidad.

La incidencia de los vientos depende mucho de la situación de la piedra, es decir, de cuán protegida esté por defensas naturales (como los árboles) o artificiales (por ejemplo, construcciones aledañas).

Los efectos del viento considerados más importantes son: PULIMENTO de la piedra, ABRASIÓN de la parte inferior de las edificaciones, producción y agrandamiento de ALVÉOLOS (ya que se forman en ellos remolinos con material abrasivo en suspensión) y, por último, destrucción por COMBINACIÓN CON SALES SOLUBLES

Este último punto es importante ya que el viento influye en la cristalización de sales al aumentar la velocidad de evaporación del agua capilar, eliminándose el agua de la superficie. El viento mismo puede servir de transporte a estas sales.





### ACCIÓN DE LAS VIBRACIONES

Las vibraciones que afectan a las piedras pueden ser naturales, como son los sismos, los terremotos, etc. O pueden ser provocadas por el hombre como las vibraciones debidas al tráfico.

La forma en que las vibraciones pueden afectar a una edificación depende de las características de estas vibraciones (amplitud y frecuencia) y de las características de la edificación (densidad de los materiales, forma y tipo de construcción).

Evidentemente, las vibraciones provocadas por causas naturales como los sismos y los terremotos, son las más destructivas. Las vibraciones que produce el tráfico suelen ser en general de baja intensidad.

Pero son las irregularidades de la calzada por la que circula el tráfico lo que influye de manera decisiva en la acción que pueden tener las vibraciones en la alteración de las construcciones pétreas.

Cada objeto tiene unas frecuencias propias de la vibración, que dependerán de la masa del objeto y de su forma. Si las frecuencias de vibración de las edificaciones coinciden con la frecuencia de vibración del tráfico –que en general son parecidas–, se producirá el fenómeno conocido como resonancia.

Este fenómeno consiste en que cada vez que el objeto oscila, la vibración original le produce un nuevo impulso, y esto dará lugar a la amplificación de la amplitud de la vibración original.

Al mismo tiempo, la naturaleza de los materiales amortigua o aumenta las vibraciones. Mientras que el cemento de Pórtland transmite las vibraciones por ser un material rígido, los materiales elásticos (como pueden ser las argamasas de cal) tienen mucha capacidad de absorción de vibraciones.

El efecto producido por las vibraciones pueden ser grietas que tengan forma de “x”.

## 1.4. Factores biológicos

La presencia de organismos vivos no supone, de por sí, un daño para la piedra. Sin embargo, existen determinados organismos que se asientan sobre los materiales rocosos y que juegan un papel importante en la alteración química y física de los mismos. A este daño se le conoce como BIODETERIORO.

Entre los agentes bióticos de mayor importancia se pueden nombrar a las bacterias, a los hongos, a las algas, a los líquenes, a las briofitas, a las plantas superiores y a los animales. Las alteraciones de origen biológico se deben, entonces, a la acción de:

- MICROORGANISMOS (HONGOS Y BACTERIAS)
- ALGAS Y MUSGOS
- LÍQUENES
- ÁRBOLES Y PLANTAS SUPERIORES
- ANIMALES

### ACCIÓN DE LOS MICROORGANISMOS (HONGOS Y BACTERIAS)

En general, los hongos aparecen en la superficie de las piedras en forma de moho, de color gris o verde, negro o marrón. Con su presencia desfiguran los relieves y atacan a las piezas esculpidas. La existencia de hongos en las piedras es un indicador muy importante de un alto contenido de humedad.

Además, algunos hongos (junto con algunas bacterias) pueden generar ácidos orgánicos, de efectos lentos pero dañinos para el material pétreo.

La presencia de contaminantes atmosféricos, sumados a la humedad ambiental, pueden favorecer el crecimiento de distintos tipos de microorganismos sobre las rocas, lo que contribuye significativamente a su biodeterioro. El ciclo de vida de algunas bacterias conduce a la formación de ácidos.

Un ejemplo es el de los tiobacilos, que producen ácido sulfúrico a partir de sulfuros naturales en las rocas o de productos de contaminación. En general, el resultado de la producción de ácidos por parte de los microorganismos es la formación de sulfatos y *COSTRAS NEGRAS*, de manera similar a la acción del ataque químico.



IMAGEN 116. Detalle del deterioro y de la formación de capa de arenisca en la Iglesia de San Vicente, San Sebastián.

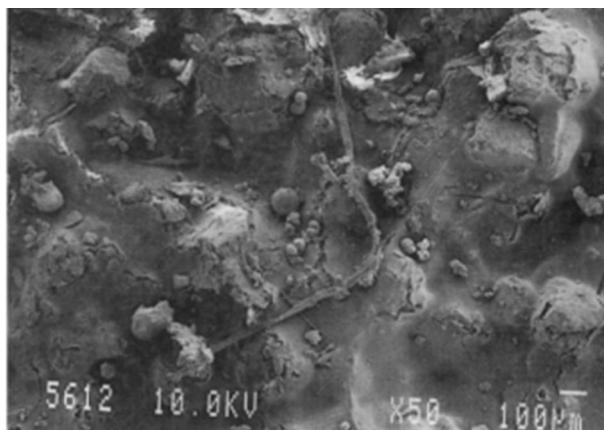


IMAGEN 117. Microscopía electrónica. Hifas de hongos sobre la capa de arenisca deteriorada (x50).

Además de los ácidos sulfúricos, los microorganismos pueden producir otro tipo de ácidos inorgánicos, como el ácido nítrico y el ácido carbónico.

Las bacterias atacan los soportes lapídeos a través de procesos químicos. Las sulfobacterias oxidan el azufre a sulfato, las nitrificantes producen nitritos y nitratos y las bacterias del hierro tienen participación en los fenómenos de oxidación-reducción de ese metal. Existen otras actividades que pueden influir en el biodeterioro de los

edificios y que involucran a los microorganismos, como la producción de ácidos orgánicos, de agentes quelantes, de adhesivos y surfactantes, de polisacáridos. Incluso, los microorganismos están relacionados con mecanismos físicos, como la presión.

La presencia de microorganismos sobre las superficies pétreas puede

tener un origen variado, ya que pueden llegar a través del aire (su medio fundamental) o a través del suelo. Dependiendo del tipo de piedra, los microorganismos llegan a penetrar hasta varios centímetros en el interior de la misma. Por esta razón, la acción de los microorganismos no debe considerarse como meramente superficial.

Los microorganismos pueden provocar pérdidas de peso en las rocas, aunque esto varía según los microorganismos, el tipo de roca y las condiciones ambientales.

### ACCIÓN DE LAS ALGAS Y BRIOFITAS (HEPÁTICAS Y MUSGOS)

La presencia de algas y briofitas es indicadora clara de humedad. De hecho, se las



IMAGEN 118. Colonización por algas verdes en una filtración de humedades.

suelen encontrar cerca de desagües y en las partes inferiores de los edificios con problemas de capilaridad. Las algas tienen forma de filamentos verdes, rojos o marrones.

Se las puede ver en toda clase de superficies exteriores, incluyendo lugares de gran contaminación. Los efectos sobre la piedra son indirectos, ya que favorecen la colonización de otros organismos (bacterias, hongos, líquenes y plantas superiores).

La presencia de musgo en la piedra y sobre sus juntas indica un grado de humedad anormal, y con ello la posibilidad de daños importantes en el material pétreo.

Pero, a diferencia de las algas que no producen altos grados de degradación, el musgo puede degradar hasta un centímetro o más por debajo de la superficie.

Si existe presencia de cales o de cemento, la aparición de los musgos se favorece.

Las algas y los musgos producen, además, agentes quelantes<sup>11</sup>, que se combinan con ácidos orgánicos, inorgánicos y con metales. Estos, luego, reaccionan con los minerales y forman sales solubles.

<sup>11</sup> Sustancia de naturaleza química que tiene la facultad de unirse a los iones metálicos. Fuente: [http://es.wikipedia.org/wiki/Agente\\_quelante](http://es.wikipedia.org/wiki/Agente_quelante)

### ACCIÓN DE LOS LÍQUENES



*IMAGEN 119. Líquenes blancos en muro de piedra.*

Los líquenes son organismos de doble naturaleza, ya que son una simbiosis entre ciertas especies de hongos y de algas. Su presencia es frecuente en las superficies pétreas, aunque no aparecen en atmósferas contaminadas debido a que son poco resistentes a ese ambiente.

Los líquenes crecen y se expanden a un ritmo muy lento (1 milímetro de diámetro por año), toleran temperaturas extremas y sobreviven en ambientes poco húmedos por períodos de tiempo largos.

Existen muchas variedades de líquenes, pero los que provocan mayores daños son los blancos incrustantes. La piedra se descompone bajo los líquenes en algunos milímetros, y se carga de oxalato cálcico por la acción del ácido oxálico que estas plantas generan. Los líquenes generan ácidos, por lo que colaboran con la destrucción de la piedra. El resultado es un cambio de textura superficial. Los líquenes, junto con las algas y los musgos, generan PÁTINAS BIOGÉNICAS, como así también COSTRAS BIOGÉNICAS. Los líquenes endolíticos que generan costras biogénicas pueden causar graves lesiones, ya que pueden actuar desde el interior de la roca sin manifestación exterior.

### ACCIÓN DE ÁRBOLES Y PLANTAS SUPERIORES

Estas plantas no ocasionan daños directos a las piedras, con excepción de la acción de las raíces, cuya savia ligeramente ácida puede provocar alteraciones en forma de manchas en los mármoles y en las piedras calcáreas de colores claros.

Además, las raíces se introducen en las grietas y ejercen así su efecto químico, pero también mecánico, de alteración. El crecimiento de estas raíces puede provocar tensiones muy fuertes en las piedras, y generar su fisuración.





### ACCIÓN DE LOS ANIMALES

Los animales más destacables en cuanto a su acción deteriorante de las piedras son las aves. Sus excrementos contienen nitratos que contribuyen al deterioro de la piedra, además de ensuciarla. Las materias fecales originan ácidos orgánicos que, al ser transportados por la lluvia, pueden provocar alteraciones. En este punto habría que incluir la acción destructiva del hombre, cuya evidencia más dañina para las piedras son los incendios, que ocasionan daños irreversibles. Otras formas de alteración directa son los grabados en piedra, los usos de pinturas inadecuadas, los actos de vandalismo, etc.

### **1.5. Factores de tensión**

Antes de ser colocadas las piedras en el edificio, al ser extraídas de las canteras sufren una descompresión que puede originar factores o tensiones que permanecen residuales, sumándose a las ejercidas por el edificio.

Como integrantes de la construcción soportan tensiones sostenidas verticales, por la propia carga del edificio, y de empuje, debidas a fuerzas no verticales ejercidas por taludes, rampas, etc., así como tensiones periódicas, debidas al viento, asentamientos, etc. Todas ellas pueden originar rupturas y han de tenerse en cuenta no sólo a la hora de hacer ampliaciones sino también en las demoliciones, es decir, en cualquier actuación que modifique el equilibrio estático alcanzado.

Otras tensiones, como las generadas por la labra de la piedra, serán consideradas en el *apartado 1.7* como factores de uso.

En general estos factores de tensión conducen a indicadores de rupturas, en sus diversos grados.

## 1.6. Factores de incompatibilidad

Se consideran aquí todos los factores derivados del contacto de materiales diferentes entre sí y que provocan alteraciones por sus interacciones de tipo físico o químico. Así, por ejemplo, las tensiones entre materiales de diferentes coeficientes de expansión térmica o resistencias mecánicas, las provocadas por el hinchamiento de espigas metálicas de sujeción al oxidarse) o incluso las migraciones de cationes entre piedras de diferente coloración.

Conducen, pues, a indicadores de ruptura y cromatizaciones.

## 1.7. Factores de uso

Se engloban en este apartado todos los factores de alteración derivados del proyecto de ejecución, desde la situación geográfica del edificio, diseño, orientación, etc., hasta los labrados y tratamientos, etc.

Así, por ejemplo, las técnicas de extracción de cantera y de labrado de la piedra introducen tensiones que actúan como factores de alteración.

La situación geográfica va a implicar las condiciones climáticas en las que se encontrará el edificio, lo cual puede contemplarse con distintas ópticas, desde el clima de la región .El microclima del ambiente más próximo, o incluso el nanoclima, considerado en los puntos adyacentes a la piedra.



*IMAGEN 120. El Castillo de San Petri en Cádiz es un buen ejemplo de edificación muy influenciada por su situación, afectada por los vientos del Levante cargados de polvo.*



El clima más desfavorable para la conservación de la piedra es el clima continental en ambiente urbano. Asimismo, la proximidad al mar, las zonas de alta actividad sísmica, o la recepción de vientos con alto contenido en polvo, van a introducir factores de alteración ligados a la situación geográfica.

La elección inadecuada de materiales como morteros, productos de tratamiento espigas metálicas de sujeción pueden considerarse en este apartado, aunque en ocasiones también tendrán cabida en el de incompatibilidad de materiales.

Las obras de mantenimiento inadecuadas los ruidos y todos aquellos factores que se derivan del uso o abuso del edificio, como utilización inadecuada, exceso de visitas que modifican el nanoclima, construcción de edificios vecinos muy próximos, etc.

## 2. PATOLOGÍAS Y ALTERACIONES DE LA PIEDRA

Desde que el hombre comenzó a construir edificaciones utilizando a las piedras como elemento base, tuvo que lidiar con ciertos problemas inherentes a ellas.

Estos problemas, más o menos importantes, están relacionados con la degradación del material. Al verse expuestos al medio ambiente, los materiales pétreos comienzan a sufrir una serie de procesos de alteraciones y desgastes.

Los procesos de alteración se originan porque las nuevas condiciones en que se encuentran los materiales pétreos distan mucho de aquellas condiciones termodinámicas en las que se formaron.

De este modo, las rocas sufren reajustes estructurales y composicionales tendientes a encontrar un nuevo equilibrio, aunque muchos de estos procesos pueden derivar en daños de los materiales pétreos.

Las piedras pueden sufrir alteraciones originadas en propiedades intrínsecas del material, en la forma en que se extrajo el material de la cantera, en su utilización en la obra y en su cuidado posterior.

Pero es especialmente a partir del uso del carbón y del petróleo como combustibles que los fenómenos de degradación de las rocas se agudizaron.

La razón está en que estos tipos de combustibles dejan grandes cantidades de residuos en el aire, que luego se depositan sobre las superficies rocosas, alterándolas.

Las alteraciones que pueden sufrir los materiales pétreos son muy variadas e introducen distintos tipos de cambios en las piedras, ya sea en el color, en su textura, en su composición química o en su aspecto en general. Cada cambio es signo de un tipo de deterioro característico, siempre relacionado con la composición y estructura de la piedra en sí misma.



Hay que tener en cuenta que no todas las alteraciones implican daños físicos irreparables en los materiales pétreos, sino que son indicadores de la acción del ambiente sobre la roca. El estudio de las alteraciones es lo que proporcionará la información necesaria para su tratamiento y mejora.

La definición correcta de los tipos de alteración que se encuentran presentes en las piedras de construcción, junto con el análisis del material alterado y de la ubicación de las lesiones en el edificio, proporcionan las claves para poder entender los mecanismos de alteración que están teniendo lugar.

Así, la catalogación y descripción de los tipos de alteraciones o daños con que se enfrentan las rocas permite identificar la naturaleza de los diversos procesos de alteración.

Estos procesos, como se ha visto en el capítulo anterior son de tipo físico, químico, biológico, mecánicos o ambiental.

## **2.1. Alteraciones de las Rocas**

A continuación, se enunciarán y describirán las formas de alteración más comunes que se pueden encontrar en las piedras de construcción. Muchos de estos tipos de daño están relacionados entre sí. Es el caso en que una alteración, con el tiempo, deriva en otra más grave y más profunda.

### PÁTINAS

Son las películas o capas delgadas que recubren las piedras, a nivel superficial. Constituyen una alteración y una modificación superficial de los materiales pétreos, pero no implican necesariamente que exista un proceso de deterioro del material. Esta forma de alteración produce variaciones del aspecto superficial de la piedra, como consecuencia de su exposición al medio ambiente durante períodos de tiempo considerables. Las pátinas se manifiestan en general como cambios de coloración de la superficie de las rocas y pueden tener su origen en causas naturales o artificiales.



Dentro de las pátinas existen distintos grupos:

- **PÁTINAS DE ENVEJECIMIENTO.**

Se denomina de esta manera a la tonalidad típica o aspecto externo que adquiere una piedra, cualquiera que sea, con el paso del tiempo y con los efectos de su exposición al medio ambiente.

- **PÁTINAS DE DECOLORACIÓN.**

Se denomina de esta manera a la decoloración natural o artificial que pueden sufrir los materiales pétreos. Estas pátinas implican la pérdida de color de la piedra. Pueden ser consecuencia del continuo lavado de los materiales rocosos con el agua de lluvia, por ejemplo.

Es frecuente que este tipo de pátina lleve asociada pérdida más o menos importante de material pétreo de superficie.

- **PÁTINAS CROMÁTICAS.**

Se denomina así a la capa de color artificial o natural que presentan algunas de las piedras en las construcciones humanas.



IMAGEN 121. Aspecto de la Portada de Santa María en la Catedral de Burgos. Las pátinas originales que pudieron existir fueron eliminadas por la intensa limpieza llevada a cabo en la reciente intervención, siendo sustituidas por una veladura ocre de tono salmón.



*IMAGEN 123. Pátina cromática verde por migración de cobre de la toma de tierra en la catedral de Burgos.*



*IMAGEN 122. Pátina cromática de herrumbre localizada en el exterior de una vidriera en la capilla de San Ana, Burgos.*

- **PÁTINAS BIÓTICAS.**

Son películas de carácter orgánico. Estas pátinas pueden ser de tonalidades muy variables. Las pátinas biogénicas son capas muy finas compuestas de organismos vivos que se desarrollan sobre las superficies pétreas.

Generalmente, estos organismos son líquenes, algas o musgos.

Los organismos de las pátinas biogénicas confieren una coloración que puede variar desde el pardo oscuro al amarillo, y que incluyen también en su gama a los tonos verdes y rojizos.

Evidentemente, el color de este tipo de pátina dependerá del organismo que se encuentre en ella, del clima circundante y del ciclo de vida del organismo que la componga.





IMAGEN 124. Pátina biológica, fundamentalmente líquen, proporciona su aspecto dorado a la Catedral de Santiago de Compostela.



IMAGEN 126. Patinas naturales por oxidación de minerales de hierro y magnesio sobre traquita.



IMAGEN 125. Patinas biológicas sobre granito, alterando totalmente el aspecto de la roca fresca. En este caso se trata de colonia de líquen blanco y musgo.



- PÁTINA DE TINCIÓN.

Son cambios cromáticos o tinciones superficiales de las piedras. Estas pátinas pueden estar generadas por diversas sustancias, como por ejemplo el orín, el verdín, etc.

- PÁTINA DE SUCIEDAD, PÁTINAS NEGRAS.

Este tipo de pátinas se produce por ensuciamiento de las superficies rocosas.



IMAGEN 128. Mancha en muro producida por filtración de humedad.

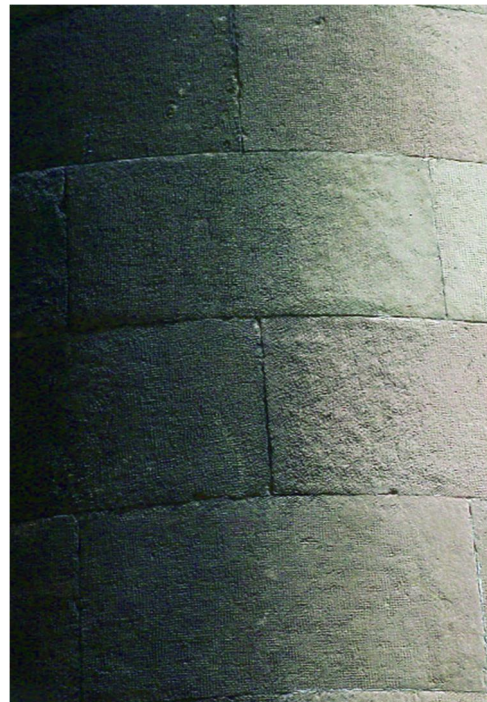


IMAGEN 127. Depósito de hollín en la parte que no recibe el lavado de la lluvia.

## EFLORESCENCIAS

Son manchas blancas producidas por la precipitación de sales solubles al migrar y evaporarse el agua en la superficie de rocas porosas. La procedencia de las sales es muy diversa; la fuente puede estar en el suelo, en aguas subterráneas, excrementos de aves,



IMAGEN 129. Eflorescencia

antiguos tratamientos, en morteros utilizados o proceder de la roca original, la cercanía al mar, etc. Las sales más comunes en las rocas de los monumentos son los sulfatos, cloruros, carbonatos y nitratos. Si la formación de estas sales tiene lugar bajo la superficie de la piedra reciben el nombre de subeflorescencias, y si se forman en el interior criptoflorescencias. Su efecto destructor es función de:

- Tipo de sal formada y lugar de cristalización de la misma.
- Condiciones ambientales, la humedad y temperatura controlan los procesos de evaporación, disolución y precipitación.
- Presencia de fracturas o cavidades en la roca, ya que la cristalización de las sales en éstas implica un aumento de volumen que tiende a aumentar el grado de fracturación o del tamaño de las cavidades.



IMAGEN 130. Eflorescencia por debajo del mortero de restauración, con el consecuente desprendimiento de material y deterioro de la piedra.





*IMAGEN 131. Eflorescencias de sulfatos sobre arenisca.*



*IMAGEN 132. Eflorescencias plumosas de sulfatos y nitratos en la cripta de Santa María de Requena, Valencia.*



*IMAGEN 133. Eflorescencias de yeso por removilización de la capa de preparación, en el Pórtico de la Gloria en la Catedral de Santiago de Compostela.*

### DEPÓSITOS SUPERFICIALES

Son una forma de alteración que se produce con la acumulación, a través del tiempo, de materiales de diversos orígenes sobre las superficies pétreas.

Estos elementos depositados pueden ser el polvo, el hollín, los excrementos de aves, el humo o cualquier tipo de organismo biológico. Los depósitos superficiales no suelen presentar cohesión y su espesor es muy variable.



IMAGEN 134. Depósito superficial sobre granito.

Tampoco presentan gran adherencia al material pétreo sobre el que se acumulan. El color de los depósitos superficiales puede variar desde el gris oscuro (cuando se deben a acumulación de polvo del ambiente) hasta el blanquecino (cuando proceden del material rocoso pulverulento que se puede haber desprendido por la existencia de otras alteraciones de las rocas o de las sales solubles de las eflorescencias).

Los depósitos de origen orgánico, y especialmente los excrementos de palomas y de otras aves, son los más relevantes en cuanto a las alteraciones de los materiales pétreos. Esto se debe a que presentan un carácter ácido, por lo que se convierten en agentes nocivos para las capas de piedra subyacentes.

### ALVEOLIZACIÓN

Consiste en la aparición de una red bastante continua de cavidades alveolares, que pueden estar originadas por la disolución, o hidrólisis seguida de disolución, de determinados minerales como pueden ser calcita o yeso, o por la acción del viento cargado de partículas, o por la acción de las raíces de plantas.

Es una alteración característica de algunos materiales rocosos granulados y porosos (especialmente de las areniscas). Este tipo de alteración está en general relacionada con la presencia de sales solubles. A la alveolización se la llama también EROSIÓN ALVEOLAR, TAFONIZACIÓN o METEORIZACIÓN EN PANAL.



IMAGEN 135. Alveolización de una caliza.

### ESCAMAS

Son películas o láminas superficiales. Se caracterizan por tener un espesor de alrededor de un milímetro. Las escamas pueden llegar a desprenderse fácilmente de las superficies pétreas. Este proceso constituye la alteración denominada DESCAMACIÓN. A través del tiempo las escamas pueden devenir en COSTRAS.



## DESCAMACIONES y DESPLACACIONES

Son dos formas de alteración que presentan cierta relación mutua.



IMAGEN 136. Descamación por cristalización de sales.

La descamación es el levantamiento y separación de las escamas formadas en la superficie de las piedras.

Si este fenómeno de descamación tiene lugar en una escala mayor y lo que se desprenden son superficies de roca grandes (de varios milímetros de espesor), la alteración se denomina

desplacación y las partes que se han desprendido se denominan placas. Las placas son lajas compactas, de cierta extensión y espesor uniforme aunque variable.

La desplazación se realiza de forma paralela a los planos estructurales o de debilidad mecánica de la roca. Los procesos de descamación y de desplazación se relacionan con diferentes mecanismos, tales como los cambios de temperatura y humedad y la cristalización de sales solubles.



IMAGEN 137. Muro en avanzado proceso de desplazación. Catedral de Burgos.

### COSTRAS

Son láminas o cortezas compactas de material que se forman en la parte externa de las piedras. Son el resultado de una transformación superficial por la influencia de aportes exógenos.

La naturaleza químico-mineralógica de las costras y sus características físicas son parcial o totalmente distintas de las del sustrato rocoso sobre el que se asientan.

En general, las costras se desarrollan en capas y pueden llegar a alcanzar varios milímetros de espesor. Se las identifica con relativa sencillez debido a que tienen rasgos morfológicos particulares.

Forman parte del estrato superficial, a veces con forma de caparazón o incrustaciones; presentan mayor dureza respecto al material rocoso alterado y muestran un color oscuro. El color que las caracteriza es generalmente negro o gris, ya que contiene productos carbonosos de contaminación.



*IMAGEN 138. Costras comenzando a levantarse del sustrato pétreo, dando lugar a ampollas y descamaciones.*

- **COSTRAS NEGRAS:** presentan partículas sólidas de contaminación. Estas partículas sólidas están mayoritariamente producidas por diversos procesos de combustión, como ser calefacciones, motores de vehículos, fuentes generadoras de energía (las centrales térmicas) o procesos



industriales de todo tipo. Esta forma de alteración suele evolucionar a través del tiempo, espesándose y hasta desprendiéndose del sustrato, lo que provoca que se generen otras alteraciones como las AMPOLLAS, las DESCONCHADURAS y las DISGREGACIONES.



IMAGEN 139. Diversos aspectos de costa negra y lesiones asociadas en la iglesia de San Nicolás de Bari en Avilés.

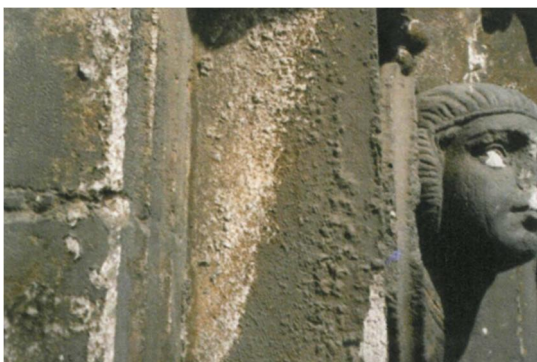


- **COSTRAS BIÓTICAS:** Estas costras están generadas por la acción de diferentes organismos, como ser líquenes, algas y musgos. A través de los productos metabólicos de estos seres se desarrollan o acentúan distintas alteraciones. Especialmente importantes en esta clase de costras es la acción de los líquenes endolíticos, porque estos líquenes pueden llegar a generar graves lesiones actuando desde el interior de la roca, incluso sin manifestación exterior.



*IMAGEN 140. Costra biótica formada por liquen blanco y verde, en Santa María de Oia (Pontevedra)*

### AMPOLLAS



*IMAGEN 141. Eflorescencias que colaboran en la formación de ampollas.*

Son costras y escamas abombadas y ahuecadas. Las ampollas también pueden eclosionar y desprenderse de la superficie de las rocas. Este proceso posibilita que se generen descamaciones que quede al descubierto una superficie pétreo disgregada, que cuando la rotura es

reciente presenta un color blanco intenso.

### DISGREGACIÓN

Es una alteración física que implica desprendimientos de material rocoso. Estos procesos ocurren cuando existe una pérdida de coherencia entre los componentes elementales de las piedras.

Al necesitar que los componentes se encuentren descohesionados para producirse, la disgregación tiene lugar de manera natural, o bajo un mínimo esfuerzo.

Las disgregaciones se distinguen morfológicamente de manera fácil por las áreas de color más claro que se pueden ver en la superficie de la piedra y por la retracción evidente que se observa respecto al nivel y volumen original de la superficie externa de las piedras. Siempre que existen procesos de disgregación, el grado de alteración del material pétreo es muy elevado.

Según el tamaño de los elementos petrográficos desprendidos se puede hacer una distinción entre dos tipos de disgregaciones:

- DISGREGACIÓN GRANULAR O ARENIZACIÓN: Se produce cuando los granos son del tamaño de la arena.
- DISGREGACIÓN PULVERULENTA O PULVERIZACIÓN: Se produce cuando el tamaño de grano es más fino que la arena.



IMAGEN 143. Arenización en granito.



IMAGEN 142. Disgregación en areniscas.



### PICADURAS

Son pequeñas cavidades u orificios formados en las piedras. El origen de las picaduras se encuentra en los procesos de erosión o de corrosión puntiforme.

Se las conoce también como PICOTEADO.

En general, las picaduras se forman a partir de pequeñas secciones de material más alterables que el resto. También por MICROKARST<sup>12</sup> o DISOLUCIÓN KÁRSTICA en materiales calcáreos.

### ACANALADURAS

Son cavidades o excavaciones que otorgan a los materiales pétreos un aspecto acanalado u ondulado. Si existe presencia de heterogeneidades en las rocas –como ser diferencia de estratificaciones o bandeados– la aparición de acanaladuras se ve muy favorecida. Estas alteraciones son más profundas cuanto más cuantiosas sean las aguas de lluvia que reciben las piedras de la construcción.

### ESTRIADURA

Se llama así a las excavaciones o acanaladuras largas y delgadas, con forma de estrías o rasgadas. En cambio, si éstas tienen forma de pistas de gusanos, es decir que son finas y sinuosas, reciben el nombre de VERMICULADURAS.

### FISURAS:

Son discontinuidades planares, hendiduras o fracturas de dimensiones variables. Pueden tener un rango que va desde las MICROFISURAS hasta las GRIETAS. El origen de este tipo de daño es diverso.

---

<sup>12</sup> *EL karst e conoce a una forma de relieve originada por meteorización química de determinadas rocas, como la caliza, dolomía, yeso, etc., compuestas por minerales solubles en agua. Fuente: <http://lema.rae.es/drae/?val=k%C3%A1rstico>*



La gravedad de esta forma de alteración dependerá del origen de la misma y del tamaño y localización que presenten.

Las fisuras pueden ser inherentes a la roca (los pelos de la cantería), pueden ser generadas por esfuerzos mecánicos, estar debidas a procesos de puesta en obra y colocación (como ser sobrecargas, asentamientos defectuosos de sillares, etc.), originadas por corrosión de elementos metálicos en contacto con la piedra o estar ocasionadas por los diversos ciclos hidrotérmicos.



IMAGEN 145. Detalle de la dolomía de Boñar, con una red de fisuras con relleno de carbonatos en un edificio de León.



IMAGEN 144. Detalle de la dolomía de Boñar, con una red de fisuras; aparecen superficies dentadas estiolíticas y fisuración con rellenos de arcillas, óxidos de hierro y carbonatos.



IMAGEN 146. Detalle de la dolomía de Boñar, mostrando fisuración natural. Algunas de sus fisuras aparecen rellenas y selladas, mientras que otras se encuentran abiertas. El desprendimiento de algunos fragmentos ha sido reparado con mortero.

## EROSIÓN

Es la abrasión o el desgaste que se produce en los materiales pétreos y que comportan una pérdida de volumen y una desaparición de las formas originales que presentaban las piedras de la construcción originalmente.

El principal agente de la erosión es el viento, combinado con el paso del tiempo, el agua y otros agentes medio-ambientales.

Los efectos erosionantes provocan incidencias de desgaste mecánico sobre la superficie de la roca. La erosión es una categoría que engloba alteraciones mencionadas anteriormente, como las picaduras, la disgregación y la arenización.

Además de las mencionadas anteriormente, se pueden mencionar otros tipos de alteración, que suelen producirse sobre la superficie de las piedras. Estos son las EXCORIACIONES, el BURILADO, las DESCONCHADURAS, las MANCHAS o MOTEADOS y las ZONAS DE LAVADO.



IMAGEN 148. Erosión de una Arenisca.



IMAGEN 147. Erosión por uso de la escalera.



En resumen estos son los tipos de lesiones más comunes en elementos de piedra.

LESIÓN	TIPOS
Pátinas	Pátinas de envejecimiento Pátinas de decoloración Pátinas cromática Pátinas biótica Pátinas de tinción Pátinas negra o de suciedad (enmugrecimiento)
Eflorescencias	Subeflorescencias Criptoflorescencias
Depósitos superficiales	
Alveolizaciones	
Escamas	
Costras	Costras negras Costras bióticas
Ampollas	
Descamaciones y esplacaciones	
Disgregación o desagregación	Arenización o disgregación granular Pulverización o disgregación pulverulenta
Picaduras	
Acanaladuras	Estriaduras Vermiculaduras
Fisuras	Rango que va de las microfisuras hasta las grietas
Erosión	
Otras formas	Excoriaciones/manchas/ desconchaduras
TIPOS DE LESIONES MÁS HABITUALES EN LOS ELEMENTOS DE PIEDRA	



## 2.2. Alteraciones en las estructuras relacionadas con degradación de materiales

### FRACTURACIÓN DE SILLARES POR PÉRDIDA DE LA ARGAMASA

El mortero cumple una función estructural constructiva. Cuando los morteros empiezan a desaparecer aparecen patologías específicas.

En muros de mampostería la pérdida del mortero provoca el desprendimiento de mampuestos. En muros de sillería, el mortero distribuye las tensiones y absorbe pequeñas deformaciones por asiento, dilatación, vibraciones, entrada en carga u otras causas. La pérdida del mortero provoca el asiento directo entre las caras irregulares de las piezas con la consiguiente acumulación de las tensiones en determinados puntos de contacto. Estos puntos no pueden soportar la carga que transmiten y las piezas, sometidas a esfuerzos concentrados, colapsan por fracturación buscando un nuevo equilibrio. Una buena estereotomía y labrado de la piedra, un perfecto ajuste entre las piezas, permite juntas más estrechas. Raramente las piezas se colocaban "a hueso", es decir, sin argamasa en un alarde de labrado de las superficies. La construcción inca es un modelo donde la piedra se encuentra casi pulida y tan perfectamente encajada que no se requiere mortero. Por el contrario, las juntas muy anchas corrigen las imperfecciones, pero el tiempo y el lavado de los morteros se encargan de mostrar las diferencias entre una buena y mala fábrica.



IMAGEN 149. La pérdida de mortero de juntas ha provocado la concentración de esfuerzos fracturándose la pieza menos resistente. Alcazaba de Mérida.





IMAGEN 151. El rejuntado superficial con mortero portland efectuado no resuelve el problema real, de pérdida de juntas por filtraciones al relleno, que también lavan los finos y provocan movimientos. En este caso se reparó la lesión aparente pero no se efectuó un diagnóstico ni se actuó en consecuencia. Alcazaba de Mérida.



IMAGEN 150. Fractura antigua, de sillar, reparada con mortero portland, provocada por la mala respuesta ante deformaciones debidas al lavado de finos de los rellenos. Alcazaba de Mérida

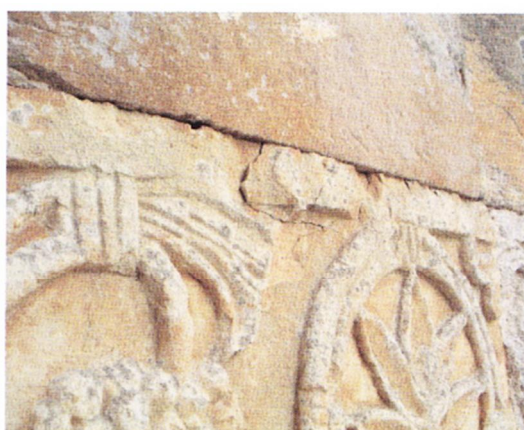
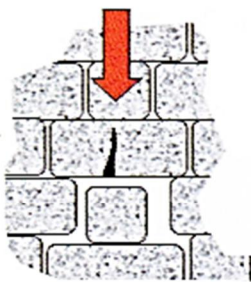


IMAGEN 152. Fragmentación de sillares antes pequeños movimientos, al haberse perdido el mortero de junta. Los movimientos bien pueden ser de origen sísmico, quedando descartado el movimiento por tráfico al encontrarse en una zona rural. Iglesia de Quintanilla de las Viñas Burgos.

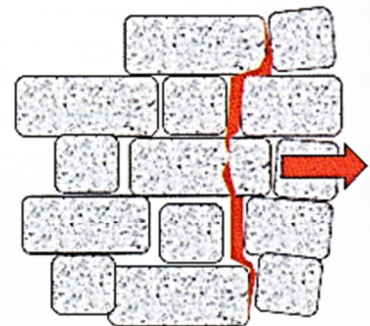
La pérdida de mortero suele ser consecuencia del lavado por el agua de las precipitaciones, bien sea porque originalmente la fábrica no se encontraba protegida, bien sea porque los elementos de protección han desaparecido a lo largo largo de los eventos que hayan afectado a las construcciones, normalmente la pérdida de cubiertas.



Descuelgue y trabajo a flexión del sillar por pérdida de mortero de juntas.



La pérdida de argamasa por lavado entre sillares provoca la acumulación de los esfuerzos en ciertos puntos. El impacto dinámico de una vibración, o simplemente el peso de la estructura, pueden llegar a producir la fisuración de los mismos.



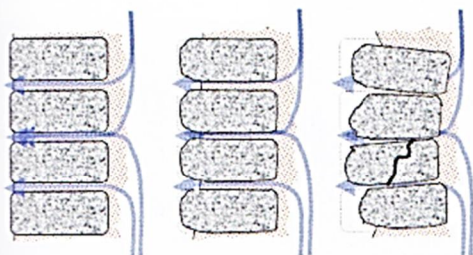
Pandeo de esquina y fracturación de sillar.

El agua de lluvia es capaz de provocar una lenta disolución del ligante de los morteros de cal que se acelera en ambientes contaminados. Los granos del árido quedan sueltos entonces y son arrastrados. Este proceso se puede producir a partir de las escorrentías o de filtraciones a través de las zonas de coronación desprotegidas. En ambos casos se produce la pérdida de juntas con los efectos ya descritos, según se trate de mampostería o sillería.



IMAGEN 153. Izquierda, grieta de desarrollo vertical por presión de los rellenos en el Castillo de Jadraque. Derecha, abombamiento en la torre y grieta de desarrollo vertical por presión de los rellenos y lavado de finos en la alcazaba de Mérida. La grieta es antigua y se ha sellado con ladrillo.





El deterioro afecta primero a juntas y parte externa de sillares. Finalmente, la argamasa de piedra, se producen asientos diferenciales y desplazamientos. Los sillares aparecen redondeados y arenizados.



La progresión del ataque salino es desde la superficie hacia adentro. Comienza por hinchamiento y apertura de la microfisuración. La capa afectada se separa del sustrato sano. Después se areniza y desprende.

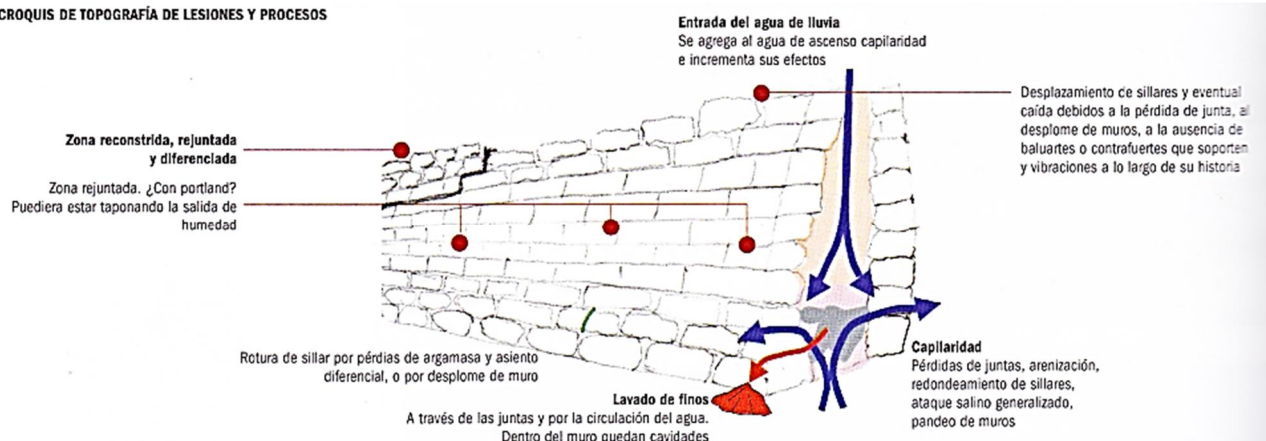
El ataque comienza con la cristalización de sales en espacios intergranulares y cruceros. El agua va hidrolizando los feldspatos transformándolos en minerales arcillosos. Las micas se hinchan. Finalmente el conjunto se areniza.



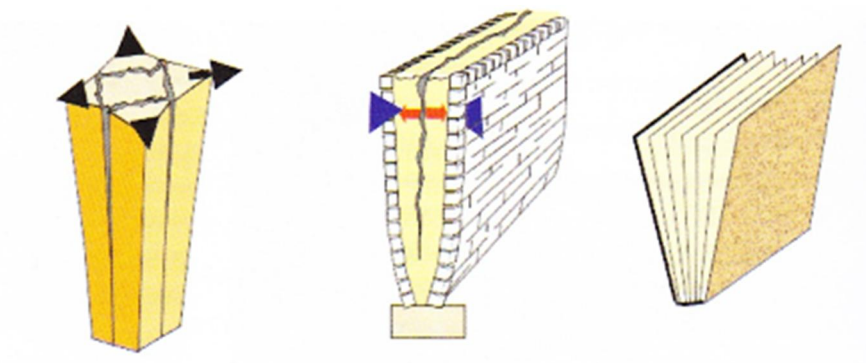
IMAGEN 154. Colapso por abombamiento

Las patologías más graves, sin embargo, se originan en muros de doble hoja con relleno entre ambas. Ya se ha descrito anteriormente la pérdida, por lavado, del mortero de relleno interior. Estos rellenos, en las construcciones de mayor calidad, están constituidos por cal y cantos, trabados por perpiños de piedra o llaves de madera. Sin embargo, en otras ocasiones, el relleno es de tierras y escombros, y las hojas de sillería pueden no encontrarse trabadas. La entrada de agua a través de la coronación de los muros, y el lavado de este relleno, conllevan la aparición de huecos internos y la pérdida de la compacidad del conjunto. La consecuencia es el pandeo con eje horizontal con charnela a un tercio de la altura y finalmente el colapso, con dicha charnela como bisagra.

#### CROQUIS DE TOPOGRAFÍA DE LESIONES Y PROCESOS



Otras veces, cuando la zona de coronación no se encuentra trabada como consecuencia de una mala construcción, pero más frecuentemente por degradación (pérdida de cubiertas o pavimento de coronación en las murallas), se pueden abrir fisuras longitudinales, paralelas al eje del muro, y finalmente el vuelco de las hojas de sillería como un todo. El proceso es similar a apoyar un libro sobre el canto. La ausencia de apoyos laterales provoca que el libro se abra.



Esta patología se puede observar también en numerosos puentes de fábrica, tanto históricos como actuales, donde los muros de acompañamiento, estribos y tajamares no son suficientes para actuar como contrafuertes. En torres poligonales, especialmente en las cuadradas, las fisuras del mismo tipo tienden a cortar diagonalmente las caras de la sección.

La solución se encuentra normalmente en practicar cosidos, si la fábrica lo permite, y tirantes bulonados. Los cosidos pueden hacerse con varilla de fibra de vidrio embutida en resina epoxi. Los tirantes tienen el inconveniente de que se oxidan con el tiempo, provocando un problema mayor que el que existía. En elementos valiosos desde el punto de vista histórico-artístico, hay que asumir el mayor coste del acero inoxidable, teniendo presente, sin embargo, que este material tiene una durabilidad limitada. Cuando existen aguas selenitosas, por ejemplo, donde se ha utilizado mortero de yeso como argamasa, la degradación de los elementos metálicos puede ser muy rápida.



Otro tipo de fisuras se pueden deber a sobrecarga de los arcos. En este caso, los sillares de la boquilla presentan fisuras de compresión, y si la mala estereotomía (por ejemplo labradas con caras demasiado paralelas) lo favorece, se pueden descolgar dovelas. La corrección es complicada y puede hacerse mediante cosidos oportunos para sujetar las piezas en riesgo a otras más estables.

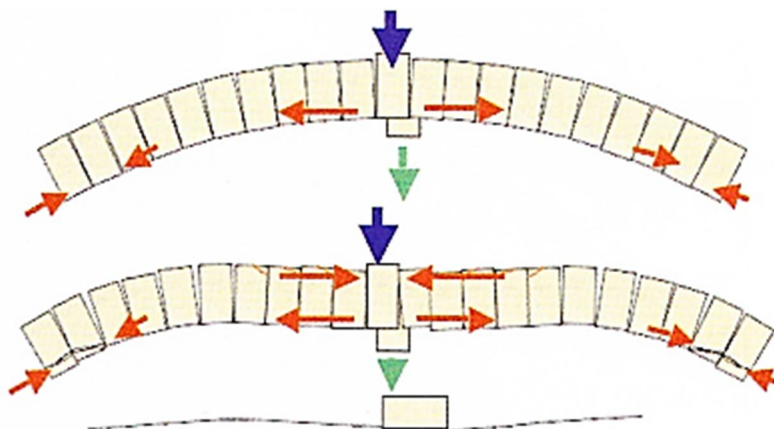


IMAGEN 155. Esquema de fisuras en las dovelas de la boquilla y descuelgue de dovelas.



IMAGEN 156. Lesiones por sobrecarga en un puente en las proximidades de Villaescusa. Descuelgue de dovelas por descompresión de la clave de la bóveda.

## GRIETAS DE ASIENTO

Normalmente mantienen un desarrollo subvertical. Si el movimiento del terreno implica rotación de una parte de la estructura hacia el exterior del terreno, la luz de las fracturas puede crecer con la cota; esto ocurre, por ejemplo, cuando existe un deslizamiento de talud en el terreno de asiento. Si el movimiento del terreno implica, en cambio, rotación de la estructura hacia el interior de la misma, la luz de las fracturas suele decrecer con la cota. Los procedimientos para corregir este tipo de patologías caen fuera del objetivo de este trabajo, no obstante efectuarán algunas consideraciones.

Los asientos diferenciales pueden tener su origen en las características del terreno, en su topografía o en ambos factores.

En cuanto al primero de estos factores, los terrenos más sensibles son los que mantienen un alto porcentaje de arcillas expansibles, los susceptibles de disolución kárstica y los constituidos por rellenos anteriores que pueden asentar con el tiempo. A veces, el desplazamiento por asiento se puede producir en construcciones sobre terrenos deformables, al ser recrecidas por elevación de plantas o torres. El recrecimiento barroco de la torre derecha de la fachada la plaza del Obradoiro de la Catedral de Santiago de Compostela provocó la inclinación de la misma, de forma que su parte superior se separó del cuerpo de la fachada y nave.

Cuando existen arcillas expansibles, éstas sufren cambios volumétricos con la humedad, la que, a su vez, depende de factores climáticos. Las construcciones históricas solían evitar este tipo de terrenos. En la construcción actual se requiere una cimentación adecuada.

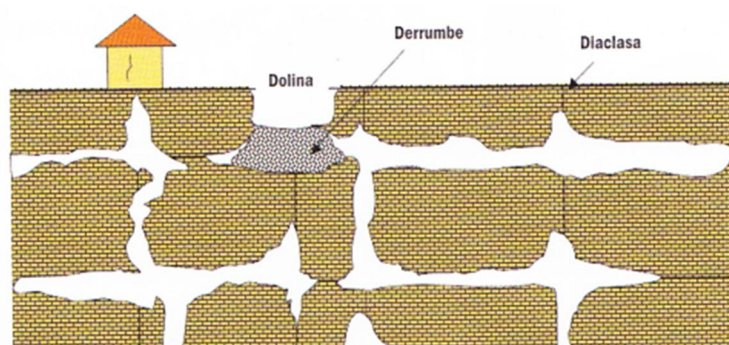


IMAGEN 157. Sistema Kárstico.



Los terrenos kársticos son los constituidos por materiales geológicos solubles a partir de la circulación de aguas subterráneas: calizas y yesos. En ellos se suele formar un complicado sistema de cavernas. Cuando el techo de una caverna se aproxima a la superficie puede colapsar, formándose una depresión en el terreno sin aparente drenaje, denominada torca o dolina. La evolución geológica de los terrenos calizos es muy lenta y, en general, no suelen presentar problemas de asiento, pero hay que tener muy en cuenta la circulación de aguas subterráneas.

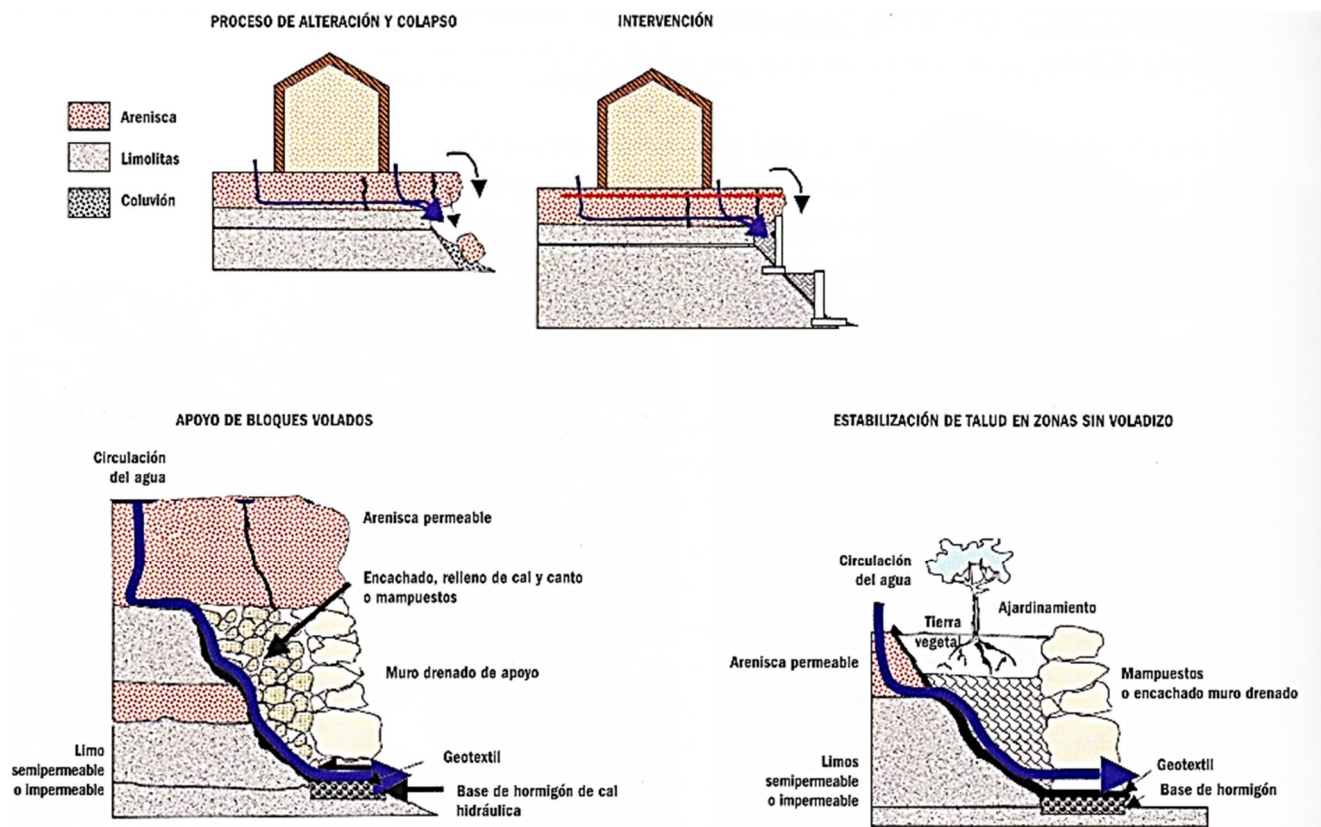
La evolución geológica del karst yesífero puede ser más rápida que la del calizo al ser el yeso mucho más soluble que el carbonato cálcico. En la construcción actual, la rotura de un saneamiento en terreno selenitoso puede provocar formación de una oquedad subterránea. Las armaduras metálicas, anclajes, cosidos o cualquier elemento de refuerzo pueden ser atacados en un tiempo relativamente corto por las aguas selenitosas.

El deslizamiento del talud suele producirse en construcciones próximas a escarpes como castillos o edificios religiosos de cotas dominantes.

Como a medida que se desciende en la serie geológica los niveles son cada vez más arcillosos, no existe un paquete compacto en los que anclar con garantías una hilera de micropilotes. La mejor solución sería detener el proceso de erosión.

Para detener el proceso de erosión, y estabilizar el talud, habría que impedir el lavado de finos de los paquetes limolíticos por el agua que se filtra a través del terreno, y apoyar los bloques que se encuentran en voladizo. Dicha intervención actúa mediante la detención del proceso de socavamiento del nivel más fácilmente erosionable.

En definitiva, de trataría de construir un murete de contención, rellenando y apoyando las zonas socavadas. Es esencial, por otro lado, que esta estructura superpuesta permita el drenaje del agua subterránea para garantizar su permanencia. Para sujetar taludes por debajo de la zona de afloramientos se puede construir muretes ajardinados de diseño similar.



Se complementa esta intervención con rellenos de las grietas para evitar la entrada de agua desde la parte superior con lechada de cal hidráulica y cosidos del paquete de arenisca bajo la iglesia. Hay que señalar, sin embargo, que, a efectos estructurales, estos cosidos son poco eficaces. Es decir, aportarían poca resistencia para impedir el vuelco del paquete de arenisca, pero pueden constituir un apoyo eficaz para evitar una mayor apertura de las grietas (con lo que el agua volvería a penetrar por ellas tras la inyección). Dado que la máxima extensión se produciría en la parte superior del paquete de arenisca, es en esta cota en la que los cosidos serían más eficaces. Para una mayor eficiencia, los cosidos no serían normales a los muros de la iglesia, sino en un cierto ángulo de forma que sus trazas sobre la horizontal formaran aspas.



## 2.3. Alteraciones producidas por vibraciones y dilataciones

### VIBRACIONES

Las vibraciones someten a los edificios y a los materiales a esfuerzos alternativos consecutivos de tensión y compresión en un corto periodo de tiempo.

Las causas de las vibraciones pueden ser naturales, como los seísmos o antropogénicas, como las debidas al tráfico rodado o aéreo.

Cómo una vibración afectará a una edificación monumental dependerá de la misma vibración (amplitud y frecuencia) y de las características de la edificación (densidad de los materiales, forma y tipo de construcción).



IMAGEN 158. Ciudad de Bam, Irán, antes y después del seísmo ocurrido en 2003.

Una vibración de 5 Hz (ciclos por segundo) y 400 mm de amplitud puede resultar molesta. Si esta vibración tuviera 50 Hz con solamente con 150 mm de amplitud provocaría daños a una persona. Una edificación histórica desde su construcción ha tenido que estar sometida a numerosas vibraciones sísmicas, aunque sean de baja intensidad. Estas vibraciones pueden deberse a microsismos imperceptibles o seísmos manifiestos. Aunque las vibraciones de baja intensidad, por sí mismas, sean incapaces de producir daños apreciables en los edificios y



materiales de construcción, sí pueden generar una fatiga que contribuya a acelerar la actuación de otros agentes agresivos al abrir microvías para la penetración del agua o disminuir la resistencia mecánica frente a tensiones estructurales o térmicas.

Vibraciones, como las producidas por el tráfico o las explosiones; viajan mediante dos ondas de diferentes características: una que se transmite por el aire (onda aérea) y se percibe como sonido y otras a través del terreno (onda terrestre). Las vibraciones sísmicas son terrestres, aunque se pueden producir ondas sónicas aéreas inducidas por las ondas terrestres. Las ondas terrestres son las que hay que tener más en consideración en su afección a las edificaciones.

El límite máximo de vibración admisible es difícil de establecer. Un criterio general puede ser aquél determinado de forma que su acción, sumada a las de las otras causas de degradación, no causen daños superiores a los que un servicio de mantenimiento pueda remitir. Este límite dependerá, naturalmente, de las características del edificio en cuestión, su estado de conservación y las características servicio de mantenimiento. En España existe una normativa específica para la afectación aceptable a distintos tipos de edificaciones, en especial a edificaciones monumentales (ITC de 10 marzo de 2011 “Voladuras especiales de RGNBSM”, Se hace referencia a la Norma UNE 22.381,93)

Por otra parte las vibraciones del tráfico rodado son, en general, de baja intensidad. La mayor influencia se debe a la onda terrestre. Su frecuencia está comprendida entre los 10 y 30 Hz, mientras que su amplitud alcanza entre 5 y 25 mm (pueden llegar a 50 mm para vehículos pesados). Las irregularidades de la calzaos sor la que circulan los vehículos influyen de forma decisiva en las vibraciones aunque la atenuación es muy fuerte con la distancia. Un incremento de la distancia al doble reduce a menos de la mitad la energía.

Las vibraciones del tráfico rodado, por sí mismas, no suelen tener la energía suficiente para provocar daños en las estructuras. Además su frecuencia de vibración suele ser inferior a las de éstas, lo que evita fenómenos de resonancia. Sin embargo, puede afectar a elementos menores u elementos ornamentales,

cuya frecuencia natural puede ser similar y, además, también se puede acelerar la agresión por otras causas (heladas, tensiones estructurales o por dilatación térmica, ataque por sales, etcétera).

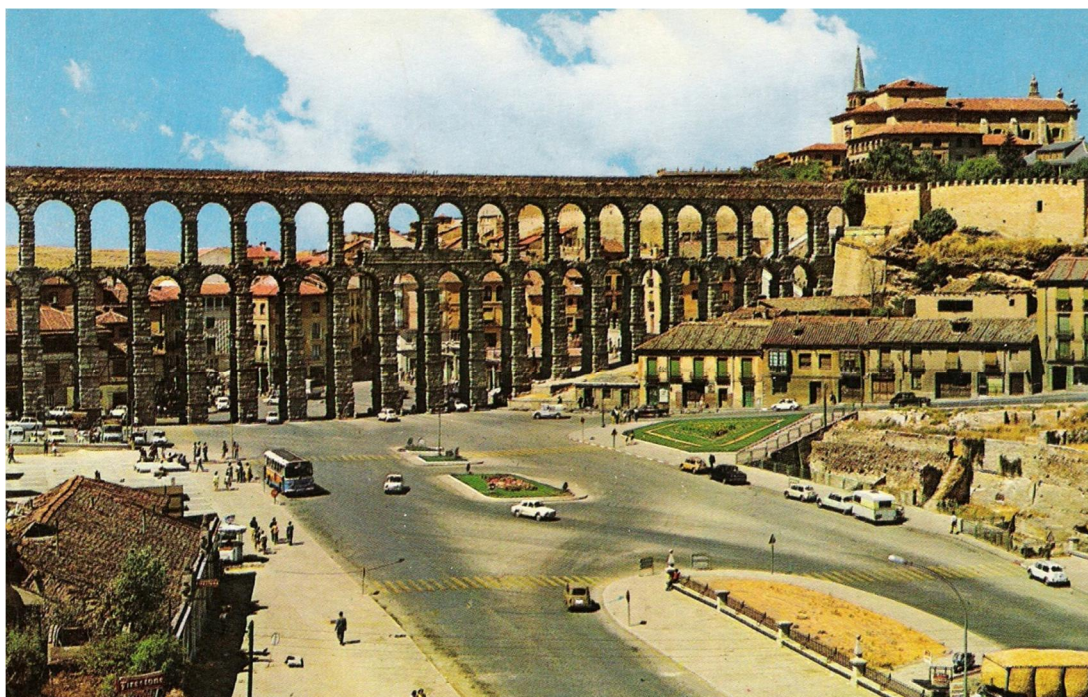


IMAGEN 160. Las fisuras en los sillares del Acueducto de Segovia se han atribuido a colapso por concentración de esfuerzos en los puntos de contacto, agravado por las vibraciones derivadas del tráfico.

Son especialmente sensibles edificios patrimoniales en los que existen enlucidos con pinturas, o ventanas con vitrales, ya que estos elementos son los que pueden resultar afectados con mayor facilidad. Las lesiones se producirán normalmente, en la zona más alejada de los puntos de anclaje a la estructura, donde la amplitud de vibración puede ser mayor. También pueden desprender azulejos y otros elementos de valor.

Otra causa de vibraciones que hay que tener en consideración es la onda aérea derivada del tráfico de aeronaves, especialmente si atraviesan la barrera del sonido. El efecto es ejercer una serie alternativa de sobrepresiones y depresiones. En este caso, los elementos afectados serán los de mayor superficie y menor espesor y resistencia a tracción. La resonancia se puede producir en elementos con periodos de vibración de unos 3 Hz.



## DILATACIONES

Los materiales se dilatan con el calor. Esto es una consecuencia de la agitación térmica que el calor induce en los átomos e iones que componen una determinada sustancia. Dicha agitación incrementa la distancia en los enlaces.

Pero no todas las sustancias sufren el mismo grado de dilatación, lo que, en la piedra y otros materiales de construcción, crea tensiones entre unos y otros minerales.

Ahora bien, de los minerales de la piedra, algunos son más isótropos<sup>13</sup> y otros menos. La calcita, componentes principales de caliza y mármoles, es un mineral muy anisótropo.

En un mármol sometido a temperatura, cada cristal de calcita incrementa su longitud empujando a los que le rodean. El resultado es que el mármol pierde su compacidad y se deshace en granos.

La textura de la piedra también influye en la intensidad del proceso. El mármol, formado por granos equidimensionales, más o menos regulares, suele ser más sensible que la caliza, integrada también por calcita, pero con texturas más irregulares y capaces de absorber las tensiones derivadas de la dilatación.

Si el calentamiento es muy brusco e intenso, la piedra decrepita. No hay más que arrojar sal gorda sobre una plancha caliente y comprobar cómo los granos de sal saltan hechos pedacitos. En la decrepitación de los minerales con el calor se basa la extracción de piedra en cantera mediante lanza térmica. El tipo de acabado superficial de la piedra, conocido como flameado, se basa en aplicar un soplete sobre su superficie para hacer decrepitar los minerales que la componen.

Además, la piedra conduce mal el calor. Como consecuencia, la superficie de la piedra expuesta a la insolación durante el día se dilata, sin que lo

---

<sup>13</sup> *Isótropo es el material que se comporta igual frente a una propiedad, cualquiera que sea la dirección considerada dentro del mismo. Se opone el anisotropismo. Fuente: <http://es.wikipedia.org/wiki/Isotrop%C3%ADa>*



haga el interior. Durante la noche se produce la contracción. Ello lleva a generar tensiones entre una capa superficial de algunos milímetros de espesor que sufre los cambios, sobre un cuerpo interior que permanece estable. El resultado es la formación y desprendimiento de placas de material afectado.



*IMAGEN 161. Decapación del mármol de Macael que compone las columnas del Patio de los leones de la Alhambra de Granada. Los daños sólo aparecen en la parte de las columnas que sufren exposición a la insolación directa.*

A veces la introducción de materiales de restauración con una dilatación térmica muy diferente respecto a los materiales históricos, como resinas puede derivar en lesiones en las zonas más expuestas.

También se han observado daños por esta causa derivados del mal diseño en la construcción, por ejemplo, por dilatación diferencial entre verjas de hierro y sus empotramientos en piedra, bien en la base, bien en los empotramientos laterales en los machones.

En restauración hay que tener en cuenta que materiales como el acero mantienen una dilatación térmica casi del doble que la piedra caliza o el mármol. Si se efectúan reconstrucciones con estos materiales, la tensión se desplazará hacia el material histórico, más débil y menos rígido, pudiendo crear una red de microfisuras que serán aprovechadas por el agua para introducir sales o provocar otros procesos posteriores de degradación.

Un caso extremo de dilatación térmica tiene lugar cuando un edificio ha sufrido un incendio. Entonces se producen dos procesos de generación de fracturas. El primero se origina durante el calentamiento y el segundo durante la fase de enfriamiento.

La dilatación de la capa superficial provoca la separación de placas sobre el sustrato más frío. Estas placas pueden llegar a desprenderse, dejando expuesto el interior en el que el proceso prosigue. Si se trata de una columna, la deplacación es concéntrica, si se trata de un muro, paralela a la superficie del mismo.

Las lesiones producidas por enfriamiento tienden a originar grietas perpendiculares a la superficie.



IMAGEN 162. En la Iglesia del Convento de San Agustín la escalera de subida al presbiterio y el relleno bajo la misma protegió la piedra del incendio.



## 2.4. Alteraciones producidas por la oxidación de elementos de hierro

En el momento que el hierro metálico se encuentra con el oxígeno atmosférico en presencia de humedad ambiente se corre el riesgo de que este se oxide para formar óxidos e hidróxidos.

Al ser porosos los productos de oxidación del hierro, ésta progresa hacia el interior de la pieza quedando totalmente afectada.

En todas las épocas, es frecuente que elementos de hierro se hayan utilizado en la construcción por su alta resistencia a la tracción para anclar, unir, zunchar, etc. También son de antiguo conocidos los problemas derivados de la oxidación de las piezas de dicho metal, por lo que normalmente se vertía plomo fundido para recubrir las partes de las piezas empotradas en la piedra. El plomo al igual que el zinc y el cobre, forma una capa de óxido que protege la progresión del óxido al interior de la pieza.

En construcciones a partir del siglo XIX, se pueden apreciar daños por esta causa en empotramientos de rejas, barandillas, anclajes de sujeción de elementos ornamentales y estructuras metálicas revestidas de ladrillo, mortero u otros materiales porosos, piezas de sujeción de aplacados y cubiertas en piedra.

Las alteraciones producidas en piedra por este fenómeno se presentan en forma de grietas y piezas fragmentadas en las que el material no parece alterado, sin embargo cuando se aprecia un elemento de hierro oxidado, el diagnóstico es más evidente.

Cuando el elemento es interno y no aparece al exterior su presencia se puede sospechar por la fragmentación múltiple, casi como si el elemento estallara a partir de su núcleo.

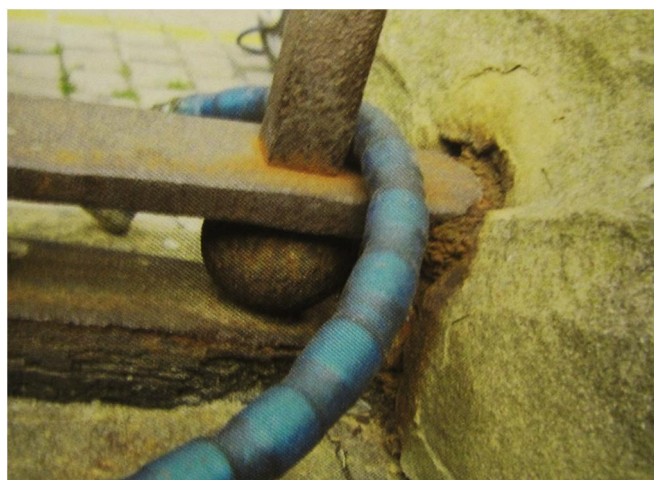




*Imagen 165. Oxidación en los anclajes y la consiguiente dilatación entre la piedra y el hierro han provocado la apertura de fisuras en la piedra. Catedral de Pamplona.*



*Imagen 164. Fractura del florón por oxidación del anclaje de hierro.*



*Imagen 163. Oxidación en el empotramiento de la verja.*



## 2.5. Alteraciones producidas por intervenciones inadecuadas.

Entendemos por intervenciones inadecuadas aquellas que provocan más daños que los que corrigen o, al menos, son inútiles y a menudo contraproducentes para su uso y vida.

Como ya se ha expresado anteriormente, este tipo de intervenciones suelen ser consecuencia de un interés inmediato en corregir las lesiones (los efectos) desconociendo el proceso que las origina (las causas). Son la consecuencia de un mal diagnóstico o, más frecuentemente, de la ausencia total del mismo.

### TRATAMIENTOS SUPERFICIALES INADECUADOS

- **LEJÍAS.** Las lejías son bases sumamente fuertes, normalmente hidróxidos de álcalis<sup>14</sup>. Si se neutralizan con ácidos pasan a formar sales de esos mismos metales, muy móviles y peligrosas. Si no se neutralizan, forman los carbonatos correspondientes con el CO<sub>2</sub> atmosférico y si existe contaminación por anhídrido sulfuroso (lluvia ácida) forman sulfatos, todas ellas también sales dañinas.

Con el tiempo, las sales van produciendo la desintegración de la superficie de la piedra.

- **PÁTINAS.** Hubo un tiempo en el que se implantó el gusto visto por la piedra y se puso de moda los tratamientos transparentes. Se empezaron efectuando tratamientos con cera y azufre. Posteriormente se implantaron los recubrimientos a base de aceite de linaza y otros aceites. Después de esto, importados desde la restauración de pinturas vinieron los tratamientos a base de resinas acrílicas y polivinílicas.

---

<sup>14</sup> Son óxidos, hidróxidos y carbonatos (los carbonatos no son bases fuertes, ya que son la base conjugada de un ácido débil y no de un ácido neutro como el agua) de los metales alcalinos. Actúan como bases fuertes y son muy hidrosolubles. De tacto jabonoso, pueden ser lo bastante corrosivos como para quemar la piel, al igual que los ácidos fuertes. Fuente: <http://www.jmcpri.net/glosario/alcalis.htm>

Estas pátinas y jabelgas de cal y yeso no lograron detener el proceso de degradación pues no abordaron la causa (la presencia de sales), pero al menos lo agravaron al ser permeables al vapor.

Las capas de cera y aceites ennegrecieron el aspecto de la piedra y agravaron el ataque salino. Por esa misma capacidad impermeabilizante las capas espesas de acrílico y resinas formaron películas que impedían la transpiración de la humedad interna, los silicatos alcalinos aumentaron las sales presentes ya que los hidróxidos de sodio y potasio son subproductos del tratamiento, los fluosilicatos crearon capas rígidas y quebradizas sin lograr consolidar el sustrato arenizado, capas que se van desprendiendo, etcétera.

Estos tratamientos suelen ser difíciles de eliminar y algunos son francamente irreversibles. El primer paso es su identificación. Las ceras responden bien a la limpieza con láser; los acrílicos y polivinilos con mucha dificultad se pueden eliminar, al menos parcialmente, con una combinación de métodos, dentro de los que el primer paso es ablandar con disolventes orgánicos; algunos son claramente irreversibles como las eflorescencias de sílice derivadas de malas aplicaciones con silicatos alcalinos o ésteres silícicos, las resinas epoxídicas y los fluosilicatos.

### REVESTIMIENTOS INADECUADOS

Tradicionalmente, los materiales se revestían con morteros y capas de sacrificio. Su función era la protección del material del sustrato, más valioso y difícil de reparar. Al encontrarse en superficie, recibían la mayor carga de agresión, climática, heladas, ataque por sales, choque térmico, etc. Estos revestimientos tenían que ser repuestos cada cierto tiempo. En general, se trataba de materiales porosos y blandos que no creaban barreras hídricas ni exportaban tensiones al sustrato.

Muchos de estos revestimientos han ido siendo eliminados al perderse el conocimiento de su función, la metodología de su confección y aplicación, la forma de vida que los sustentaba y mantenía, por un cambio en los gustos y las modas, o por la desaparición en el mercado de unos productos y la aparición de otros aparentemente con las mismas aplicaciones.

Más recientemente, los revestimientos históricos se han venido sustituyendo por materiales impermeables inadecuados, duros y quebradizos, por ejemplo, morteros a base de portland. Además de aportar sales, estos morteros rígidos, con contraste en cuanto a dilatación térmica diferencial, terminan por quebrarse y el agua de escorrentía ingresa a la estructura a través de las fisuras, sumándose al agua interna por capilaridad, condensación o filtraciones.

Al no poder eliminarse al exterior por transpiración, ya que el revestimiento forma una barrera hídrica, trata de evaporarse a través de las propias fisuras u otros poros, cristalizando las sales en el material del sustrato en contacto con el revestimiento. El sustrato, deteriorado, es incapaz de soportar el revestimiento que termina desprendiéndose.

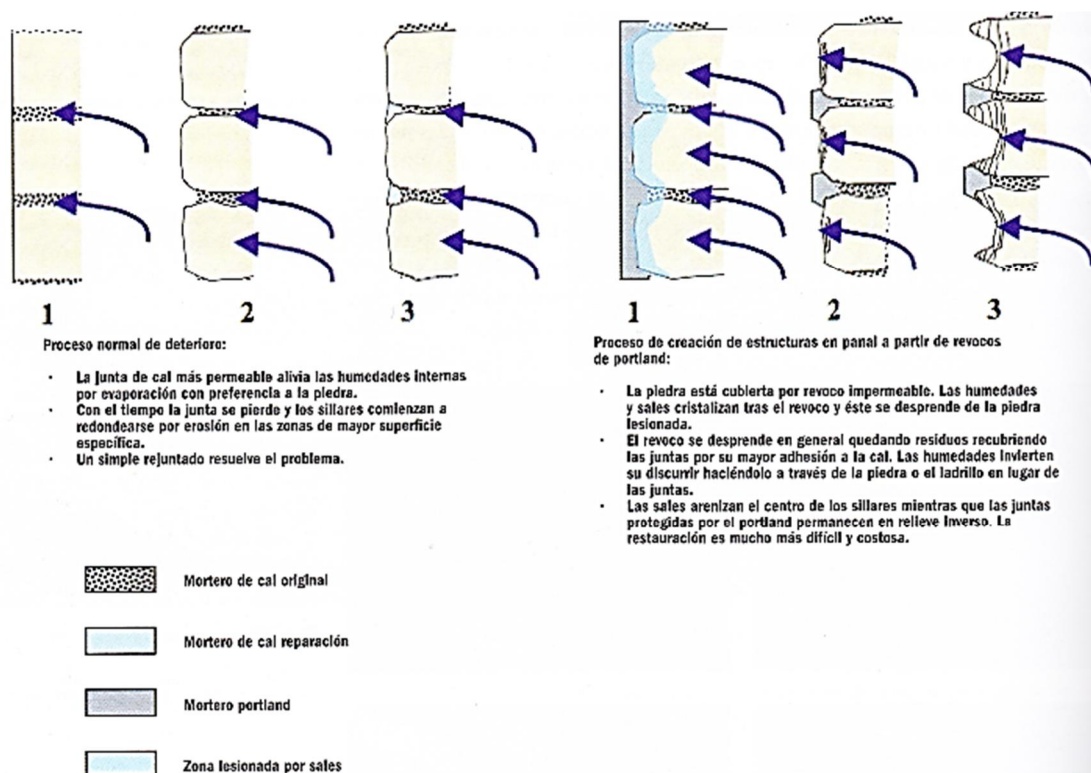


IMAGEN 166. Efecto de numerosos revocos con mortero portland



La única actuación que se puede acometer en este caso, cuando un revestimiento adecuado, por ejemplo, a base de cal, no es posible por cualquier razón o criterio, sería retirar el mortero inadecuado y sustituirlo por tratamientos superficiales invisibles, tras la extracción de sales y eliminación de humedades.

### COLOCACIÓN DE PIEZAS DE FORMA INADECUADA

Como ya se ha explicado previamente las rocas no siempre presentan una estructura homogénea e isotrópica, una vez cortadas en cantera pueden mostrar este aspecto, pero en su interior cabe la posibilidad de que presenten otra estructura en forma de anisotropismo, que únicamente se revelará con el paso del tiempo y la consecuente erosión.

La colocación de las piezas de forma que los esfuerzos de compresión sean paralelos a superficies de debilidad, puede hacer que la roca se abriese como las hojas de un libro al colocarse de canto, mientras que si los esfuerzos son normales, la resistencia mecánica de la piedra es mucho mayor. Una mala colocación, puede dar como resultado la EXFOLIACIÓN de la piedra.



### 3. DIAGNOSIS

Antes de comenzar una intervención o tratamiento sobre los materiales rocosos es necesario definir el estado actual de los mismos. Se debe investigar cuál es el grado de deterioro que afecta a las piedras, como así también determinar los procesos de alteración que los hubieren generado. Es decir, hay que indagar en las causas de ese posible deterioro. Se conoce como DIAGNOSIS a este proceso de investigación del que resultará el tipo y profundidad de deterioro de las piedras.

Los tratamientos o intervenciones que se apliquen a las piedras pueden ser de conservación y/o de restauración, pero siempre dependerán de estos estudios previos. Los estudios de diagnosis de lesiones proporcionan una imagen del problema que hay que afrontar. Las investigaciones de diagnóstico se basan en observaciones, análisis y ensayos diversos, y todos ellos contribuyen a caracterizar de manera clara y precisa el tipo de ambiente en el que se encuentra la piedra, el tipo de piedra utilizada en la construcción, su comportamiento frente a diferentes agentes exógenos (como el agua, los contaminantes, el clima) y los productos que la alteración ha generado. Esas investigaciones incluyen aspectos cualitativos y cuantitativos.

DIAGNOSIS IN SITU	DIAGNOSIS DE LABORATORIO
Análisis del entorno	Petrografía
Análisis de la construcción	Determinación de parámetros físicos
Cartografías	Ensayos de durabilidad
Ensayos no destructivos	Otros ensayos de laboratorio
DISTINTOS TIPOS DE DIAGNOSIS DE LOS ELEMENTOS PÉTREOS	

La diagnosis de lesiones comprende investigaciones que deben realizarse in situ (en el lugar) e investigaciones de laboratorio. Los estudios in situ están relacionados con la construcción y su entorno.

Los análisis de laboratorio tienen que ver con la caracterización y diagnóstico de las piedras propiamente dichas. Las dos metodologías son necesarias y complementarias para obtener un buen resultado a la hora de enfrentarse a una restauración de construcciones que involucren a los materiales pétreos.



### ANÁLISIS DEL ENTORNO

El estado de conservación de las edificaciones que incluyan materiales rocosos depende, en gran medida, de las características del ambiente en que esas edificaciones se encuentran inmersas. Cualquier construcción siempre establece un intercambio constante con el medio. Este intercambio incluye aspectos físicos, químicos, biológicos, geológicos; pero también históricos y sociales.

El CLIMA es, en gran medida, un causante de alteraciones en los materiales pétreos. La presencia de humedades en el interior de las piedras se debe, en la mayoría de los casos, al clima circundante.

Como se ha visto anteriormente, la humedad es el medio por el que se desarrollan la mayoría de los procesos de alteración de las rocas.

Estas alteraciones se deben a la acción de frentes de sales –combinadas con el viento– y a las heladas. La variación térmica pronunciada es también un factor de alteración importante.

Los cambios de temperatura originan tensiones internas de magnitud en las rocas, especialmente en los mármoles (ya que debido a su coeficiente de dilatación, la calcita presenta una gran variabilidad de su volumen). Entre los cambios térmicos más importantes se incluye la variación de temperatura entre día y noche.

Es importante asimismo conocer la orientación e intensidad de los vientos dominantes. También se hace necesario conocer la pluviosidad, la temperatura media y la frecuencia de las heladas. Del mismo modo, es imprescindible conocer la variación de la tensión de vapor del agua y el punto de rocío.

La orientación cardinal de la construcción en relación con los aspectos climáticos mencionados es otro de los puntos a tener en cuenta cuando nos encontramos realizando un análisis del entorno para el diagnóstico de lesiones de las piedras.

Como se ha especificado anteriormente, cuando el agua que recorre una construcción pétreo alcanza la superficie de la misma, se evapora produciéndose así frentes de sales. Esta evaporación, evidentemente, se acentuará cuanto mayor sea la temperatura y la velocidad del viento en el ambiente circundante.



Cuando esta evaporación se produce en la superficie genera EFLORESCENCIAS de sales y si se produce por debajo de ella, genera CRIPTOEFLORASCENCIAS de sales. Si el tamaño del poro no permite que el cristal se expanda, la presión puede vencer la resistencia mecánica de la piedra.

En ese momento se producirá la ARENIZACIÓN. El hielo actúa de manera similar a las sales cuando se cristalizan y se hidratan.

Para estudiar y caracterizar a la piedra según el TAMAÑO DE SUS POROS, se hacen necesarias técnicas de laboratorio. Las técnicas de laboratorio son una parte fundamental del proceso de diagnóstico y se verán a continuación.

Los FACTORES GEOLÓGICOS son importantes a la hora de establecer un análisis del entorno donde se halla la construcción pétreo. Determinar la existencia de ciertos procesos geológicos es imprescindible para poder confeccionar un diagnóstico acertado de la patología de las piedras.

Este estudio geológico-ambiental puede indicar la presencia de movimientos freáticos, que pueden ser causa de problemas de asentamiento de las edificaciones.

Asimismo, estos movimientos exponen a las construcciones a vibraciones sísmicas.

Es importante tener en cuenta que incluso en regiones con bajos niveles de sismicidad existen muchos temblores que pasan totalmente desapercibidos para los sentidos del ser humano.

Sin embargo, frente a esos mismos temblores que el hombre no puede sentir, los materiales de construcción pueden reaccionar si contienen armónicos de la misma frecuencia en que se producen las vibraciones.

El estudio de la influencia de la CONTAMINACIÓN AMBIENTAL sobre la construcción pétreo es parte ineludible de un análisis del entorno. Conocer el grado de contaminación ambiental que rodea a la edificación es fundamental para establecer una diagnosis correcta de las patologías.



Lo que antes eran procesos lentos de degradaciones pétreas, hoy se han acelerado debido a la polución ambiental. Cuanto más cercana se encuentre la construcción a las áreas urbanas o industriales, más rápido serán estos procesos de degradación.

Se debe estudiar qué contaminantes contiene el ambiente en la zona, su origen, cómo llegan hasta la edificación (su medio de transporte) y el nivel de exposición que tiene la construcción a los mismos.

Hay que investigar los contaminantes gaseosos que pueden hallarse en el medio. Pero es fundamental también investigar otros tipos de contaminantes, como son los pesticidas y los abonos.

Esta clase de contaminantes tiene acceso a las construcciones pétreas mediante el proceso de ascensión capilar de agua contaminada que se halle recorriendo el terreno.

FACTORES SOCIOLÓGICOS, CULTURALES Y POLÍTICOS son inherentes al medio ambiente que rodea a la edificación y son parte constituyente del entorno a ser estudiado. A estos factores que dependen básicamente de la acción humana se los conoce también como factores ANTRÓPICOS.

Los aspectos urbanísticos influyen en el entorno, modificándolo. Los asentamientos humanos originan fuego y orines que deterioran los muros de piedra. Los actos de vandalismo constituyen uno de los aportes más dañinos del hombre a los materiales pétreos.

Pero no es sólo la presencia humana lo que puede provocar alteraciones en las piedras. Hay que estudiar también la ausencia de hombres –en tanto ausencia de cuidado a la edificación– que puede provocar daños aún mayores.

Los factores antrópicos, que parecen secundarios a la hora de establecer un diagnóstico de la construcción mediante el estudio del entorno, no deben pasarse por alto.



Por último, cabe agregar que, al no ser usual que se pueda disponer de aparatos de medida meteorológica colocados en las cercanías de la edificación, los datos pueden ser solicitados a los respectivos centros meteorológicos.

También se los puede solicitar a las Consejerías de Medio Ambiente. El análisis de los datos climáticos, tanto microclimáticos como nanoclimáticos, y el análisis de los datos de contaminantes se realiza en el laboratorio.

De esta manera se pueden establecer los AGENTES Y MECANISMOS DE DETERIORO, que nos llevarán a un diagnóstico de lesiones más certero.

### ANÁLISIS IN SITU DE LA CONSTRUCCIÓN

Un ANÁLISIS HISTÓRICO es fundamental. Obliga a reunir toda la información referente a los materiales que fueron utilizados para la construcción pétreo. Esta información destacará las canteras de procedencia, los métodos de labrado y colocación, restauraciones que pueda haber tenido la edificación, los métodos de protección que pudieren haberse empleado y las sucesivas capas pictóricas. La

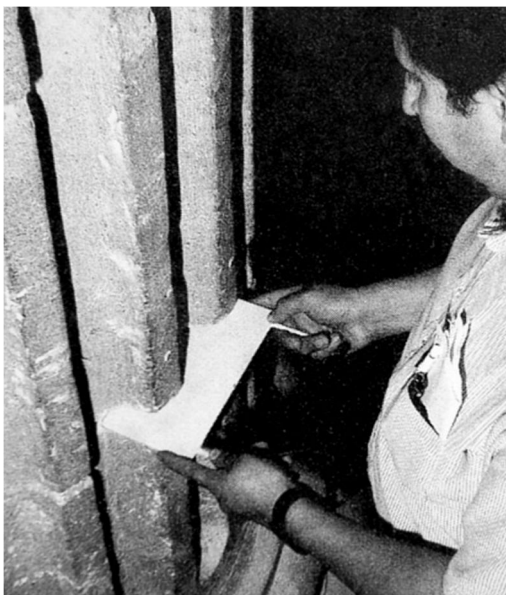


IMAGEN 167. Técnicas de inspección para determinar el movimiento de estructuras pétreas.

investigación histórica de la construcción permite localizar fuentes de material para efectuar reposiciones, en el caso de ser necesario. Además, colabora en la confección del diagnóstico, ya que permite comparar la alteración en origen y en la edificación.

El análisis de las CARACTERÍSTICAS Y ESTADO DE LA CONSTRUCCIÓN es una parte ineludible del proceso de diagnosis de patologías. Entre los puntos a ser analizados hay que incluir los defectos de

construcción. Los defectos de construcción pueden ser originales, aunque también se pueden producir por deterioro o modificación de alguno de sus elementos constructivos.

Las humedades interiores a las construcciones pétreas, formadas por condensación o mala ventilación, es otro de los puntos a ser investigados. Estas humedades son absorbidas por los muros que luego movilizan sales solubles hacia el exterior, lo que ocasiona lesiones en los materiales pétreos. Las sales solubles también se pueden movilizar hacia el interior de la construcción, deteriorando pinturas murales y frescos. Si bien este tipo de fenómenos suele deberse a la mala planificación de la construcción, lo más frecuente es que las causantes sean modificaciones posteriores. El cerramiento o apertura de huecos que antes no existían, o las labores de impermeabilización de las paredes de piedra o del tejado llevadas a cabo sin el suficiente estudio previo que pueden llegar a impedir la transpiración, son algunos de los factores que inciden en la generación de alteraciones. Los rejuntados con cemento Pórtland u otros productos pueden introducir sales o elementos de hierro que se oxidan y dilatan, lo que provoca la posterior fractura del material. Los tratamientos con resinas que se oxidan y se tornan amarillentas, cambian el tono o endurecen las capas superficiales de los materiales pétreos, que terminan por quebrarse y desprenderse.

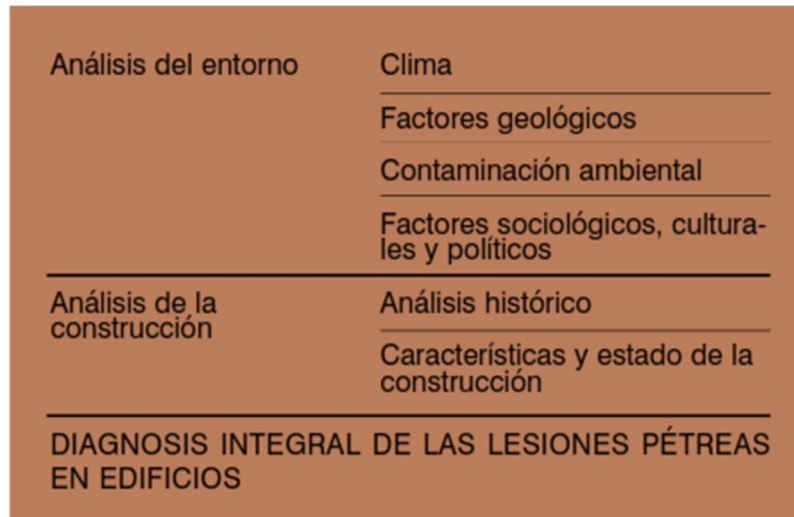


IMAGEN 168. Deterioro provocado por la eliminación de una gárgola en el Palacio de Boadilla del Monte, Madrid.

El estudio de la escorrentía de las aguas sobre las fachadas es otro de los temas fundamentales que no debería pasarse por alto en el momento de establecer un estudio de diagnóstico. La eliminación de una gárgola o de un canalón

puede, a través del paso del tiempo, dar comienzo a un

proceso de deterioro de fachada. Las barreras hídricas, debidas a salientes o a cambios litológicos con materiales de distinta porosidad, crean zonas de acumulación de humedad que vienen de la mano de los problemas salinos, proliferación de algas, musgos, hongos y bacterias.



### DIAGNOSIS DE LESIONES IN SITU

Como ya hemos dicho previamente, los estudios que deben realizarse en el lugar de la edificación están relacionados con la construcción y con su entorno.

Los trabajos en el lugar (in situ) implican la realización de CARTOGRAFÍAS SOBRE ALZADAS, tanto de los TIPOS DE PIEDRA como de las LESIONES (humedades de edificación, lesiones estructurales, lesiones de la piedra). También es necesario establecer un REGISTRO DE LAS CARTOGRAFÍAS EN SOPORTE DIGITAL o informático, a través de la digitalización de imágenes. Luego habrá que establecer CORRELACIONES ENTRE LOS TIPOS DE PIEDRA Y LAS LESIONES. Este proceso de trabajo incluye, asimismo, la recolección de datos climáticos, ambientales y de niveles y tipos de contaminación. Por otro lado, cuando las posibilidades lo permiten, se pueden aplicar al estudio de la diagnosis de lesiones de las piedras de construcción una serie de técnicas y ensayos conocidos generalmente como TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS.

Estas técnicas se pueden aplicar en el sitio de la construcción, son fáciles de utilizar, económicas y proveen de resultados casi inmediatos. Además, y sobre todo, no causan daños irreversibles en los materiales bajo estudio.

Es importante señalar que, previo a la utilización de las técnicas que se mencionarán, es muy conveniente realizar un primer EXÁMEN DE LA PIEDRA A

SIMPLE VISTA con ayuda de una lupa. El mejor lugar para la realización de esta inspección es una superficie plana, y si fuera posible, pulida. El mencionado procedimiento provee de una primera valoración del material, y no debe subestimarse ni desecharse. Una primera valoración de la textura, de las fisuras y de los poros, de la granulometría, de las discontinuidades, del estado de alteración, de la mineralogía y del color se obtiene gracias a este simple análisis.

Por otro lado, aspectos tan importantes como la compacidad, el grado de coherencia y el estado de alteración pueden ser valorados mediante el análisis de observación. La COMPACIDAD se detecta a partir de la velocidad de absorción de una gota de agua depositada en la superficie de la piedra. El grado de COHERENCIA se detecta a partir de la facilidad de disgregación de la roca frente a presiones ligeras. El estado de ALTERACIÓN se detecta mediante la observación de cambios de color, de compacidad y de coherencia.

EI CONTRASTE ENTRE LA TEMPERATURA Y LA HUMEDAD DE LOS MUROS PÉTREOS CON LA TEMPERATURA Y LA HUMEDAD AMBIENTAL constituye un método para diagnosticar y prever la formación de humedades por condensación. Dentro de las mediciones de humedad del aire, interesa especialmente conocer la humedad absoluta (gramos de vapor de agua por metro cúbico de aire húmedo) y la humedad relativa, razón expresada en porcentaje entre humedad absoluta y saturación del aire a la misma temperatura y presión. La humedad relativa de valor 0 caracteriza el aire totalmente seco y la de 100 el aire saturado.



IMAGEN 169. Sicrómetro.

Las mediciones se pueden efectuar mediante hidrómetros y sicrómetros. Aunque los hidrómetros son poco fiables, los sicrómetros son muy seguros y muestran de inmediato la lectura de valores (mediante sensores) de la humedad relativa y de la humedad absoluta. También muestran los valores de la temperatura ambiental.

La humedad de condensación proviene de partículas de agua originadas en ambientes cálidos y húmedos, en contacto con superficies que se





encuentran a menor temperatura. Se puede medir la humedad de condensación mediante aparatos que detectan las diferencias de resistencias eléctricas que presentan una superficie húmeda y otra seca. Para realizar esta medición hay que aplicar dos terminales del aparato a cada una de las superficies.

La temperatura superficial y ambiental resulta de conocimiento imprescindible para evaluar correctamente todo fenómeno de condensación. La temperatura superficial se puede medir con el termómetro óptico (mide a través de rayos infrarrojos) y nos permite conocer la temperatura de un cuerpo a distancia de manera instantánea. La termografía infrarroja también es necesaria para realizar la confección de cartografías sobre alzadas. La temperatura ambiental se puede medir a través de termómetros semiconductores, que son muy precisos y rápidos (mucho más que los clásicos termómetros de mercurio). Existen también termómetros eléctricos que son más rápidos que los termómetros de mercurio.

Los datos y mediciones que arrojen las investigaciones, deben ser recogidos y deben quedar reflejados en la cartografía sobre alzados.

### CARTOGRAFÍAS

La forma más sencilla y práctica de realizar los mapeos es la de disponer de alzadas de las fachadas de la construcción sobre las que realizar la cartografía.

Las cartografías que se deben realizar son de los diferentes tipos de piedra (LITOLOGÍAS) y de los diferentes tipos de lesiones o formas de alteración que pueda presentar.

La cartografía tanto de las lesiones como de los tipos de piedra es una herramienta muy importante de la diagnosis. Esta herramienta permitirá observar la distribución espacial de los parámetros relevados y su relación con la agresión del entorno.

## 1. CARTOGRAFÍA DE LOS TIPOS DE PIEDRA:

Se debe incluir:

- los registros gráficos de distintos tipos de piedras que se utilizaron en la construcción.
- los muestreos del material no alterado, o sano. Este muestreo puede ser en forma de polvo o de escamas.
- pequeños trozos de roca (lámina delgada).

## 2. CARTOGRAFÍA DE LESIONES:

Se incluyen:

Registro de lesiones estructurales.

- fisuras y grietas que se encuentren en la construcción. Estas fisuras y grietas deben relevarse en relación con la fábrica y en relación con el subsuelo.
- grado de estabilidad mecánica de las fisuras.

Registro de humedades de edificación.

Aquí hay que analizar y registrar:

- cómo se distribuye la humedad en los distintos muros del edificio y en las distintas partes de cada uno de ellos.
- cuál es la relación entre la orientación de los paramentos y su contenido en humedad.
- cuál es la relación entre la humedad y el diseño arquitectónico.
- cuáles son las fuentes que generan la humedad.

Registro de lesiones en la piedra.

Aquí hay que estudiar:

- las formas de alteración. Las formas de alteración en la piedra se deben estudiar en relación con la orientación del paramento en el que se ubican. También hay que analizar las en relación con las características constructivas del paramento.
- las zonas de alteración. Hay que establecer la existencia o inexistencia de alteración diferencial.
- muestreo del material alterado. Este muestreo se realiza para conocer la naturaleza química del material alterado. Si se comparan los resultados de este muestreo con la naturaleza química del sustrato se podrán identificar los agentes exógenos que pueden estar actuando en la alteración de la piedra. También permitirá efectuar una aproximación a los mecanismos de deterioro. El muestreo debe incluir al material pulverulento, a las sales solubles, a las costras y escamas. Las sales solubles deben extraerse mediante apósitos. Es importante destacar que es conveniente registrar sobre alzadas el muestreo de material. Si se realiza este registro se pueden correlacionar más fácilmente los resultados de los análisis con características de la piedra o con el lugar que ocupan en la construcción. De este modo, el registro sobre alzadas del muestreo de material ayuda a establecer con mayor precisión los factores y procesos de alteración que pueden estar actuando en la construcción pétrea.

### TÉCNICAS INSTRUMENTALES

Se suelen utilizar para llevar a cabo la cartografía, la FOTOGRAMETRÍA y la TERMOGRAFÍA.

FOTOGRAMETRÍA: se utiliza para obtener los alzados del edificio. Estudia y define con la mayor precisión posible las formas, las dimensiones y la posición en el espacio de un objeto, cualquiera que éste sea. Para hacerlo utiliza sobre todo medidas hechas sobre una o varias fotografías de ese objeto a estudiar. Aunque parezca una técnica contemporánea, la fotogrametría ya era utilizada en el siglo XVIII. En esa época las mediciones se realizaban sobre dibujos hechos a mano. Hacia mediados del siglo XIX se lo utilizaba empleando la cámara oscura para el dibujo de las perspectivas, pero ya se utilizaba también la cámara fotográfica.

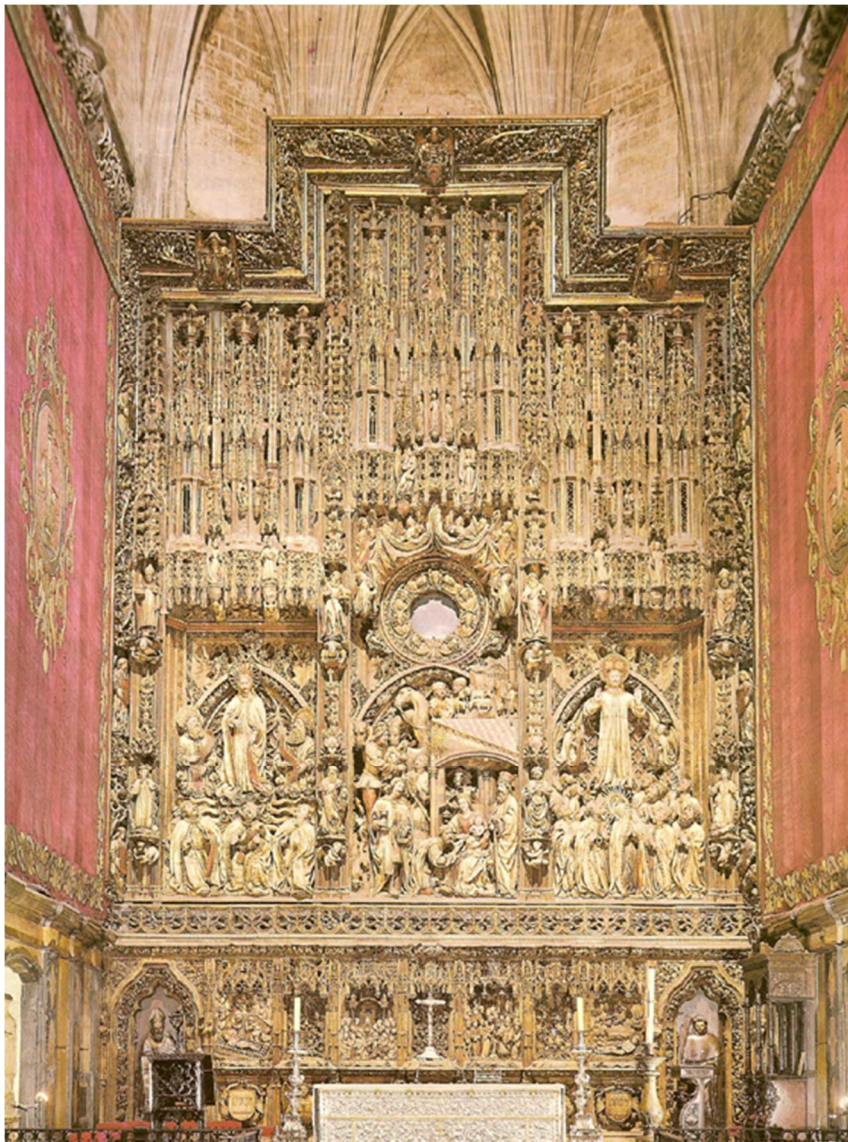


IMAGEN 170. Retablo mayor de la Catedral de la Seo, Zaragoza



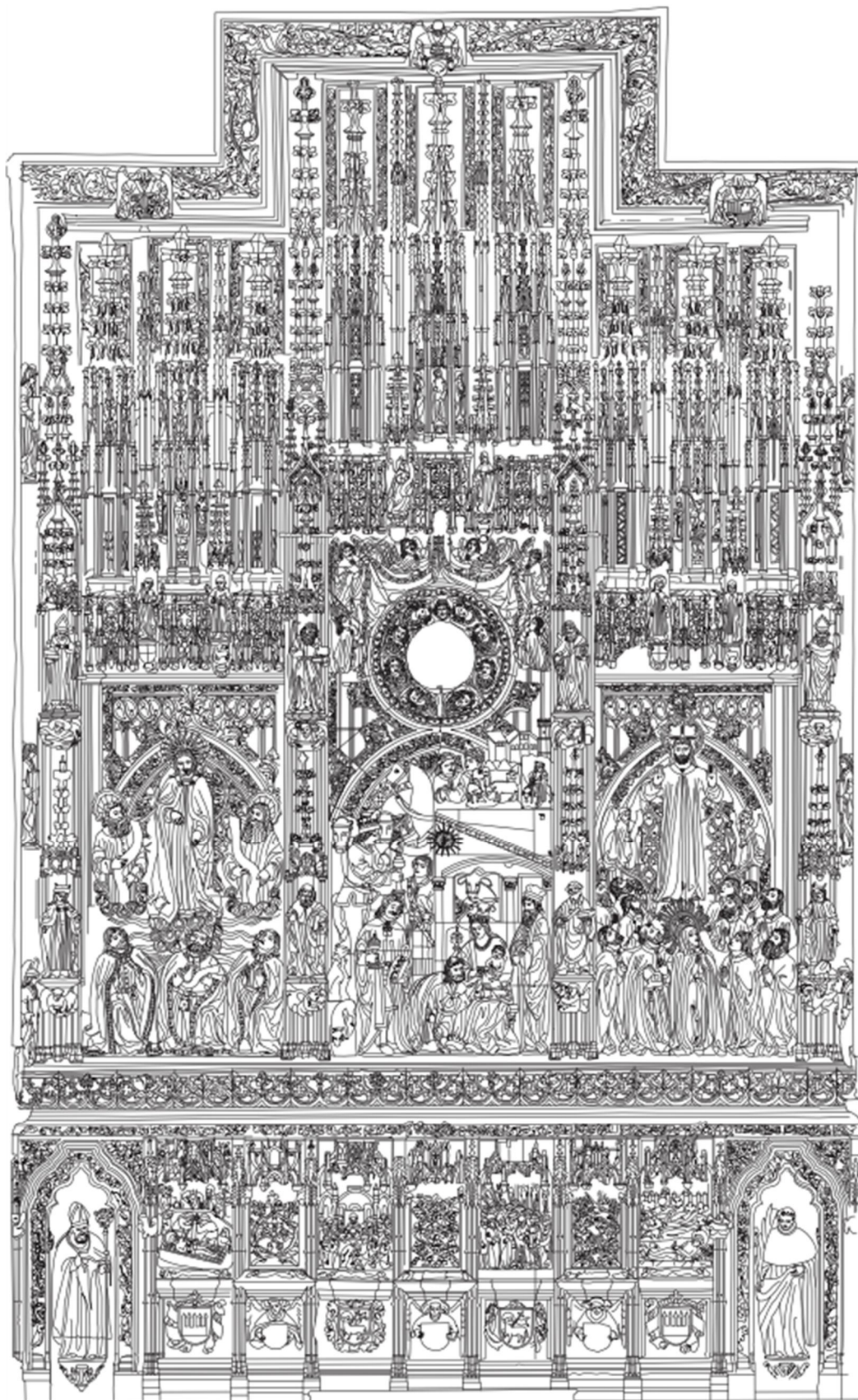


IMAGEN 171 Ejemplo de Fotogrametría. Retablo mayor de alabastro de la Seo de Zaragoza.

**FOTOGRAMETRÍA ARQUITECTÓNICA:** de acuerdo con el Comité Internacional de Fotogrametría Arquitectónica (CIFA), es una técnica que permite levantar o restituir un objeto, particularmente un objeto arquitectónico o arqueológico. Para poder llevar a cabo el levantamiento o la restitución se utilizan perspectivas del objeto en cuestión, pero registradas fotográficamente.

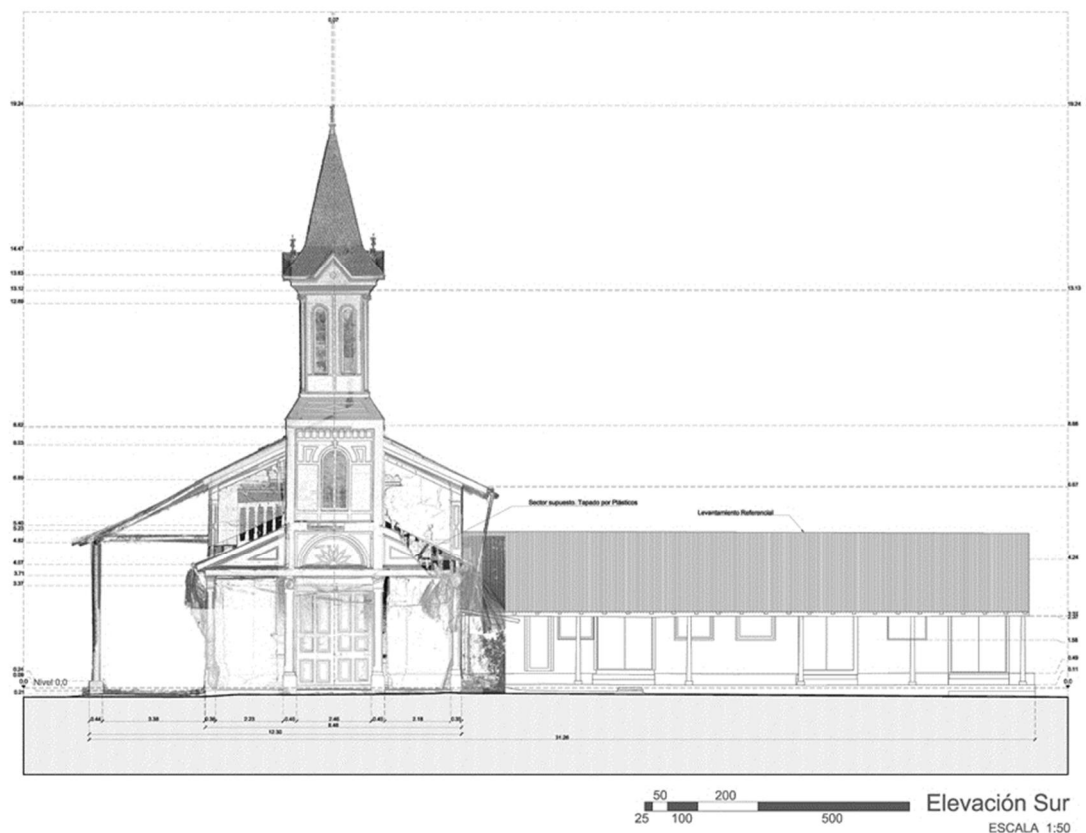


IMAGEN 172. Ejemplo de fotogrametría arquitectónica.

**TERMOGRAFÍA:** es una técnica de estudio no destructiva, que se debe aplicar en el lugar de la construcción. En general se utiliza para facilitar la distinción entre materiales constructivos de un edificio. Además, permite obtener información de la zona más superficial de estos materiales. Especialmente importante es la información acerca de la localización de zonas con diferente



grado de humedad, de fenómenos de capilaridad, de discontinuidades constructivas y acerca de las fases constructivas del edificio.

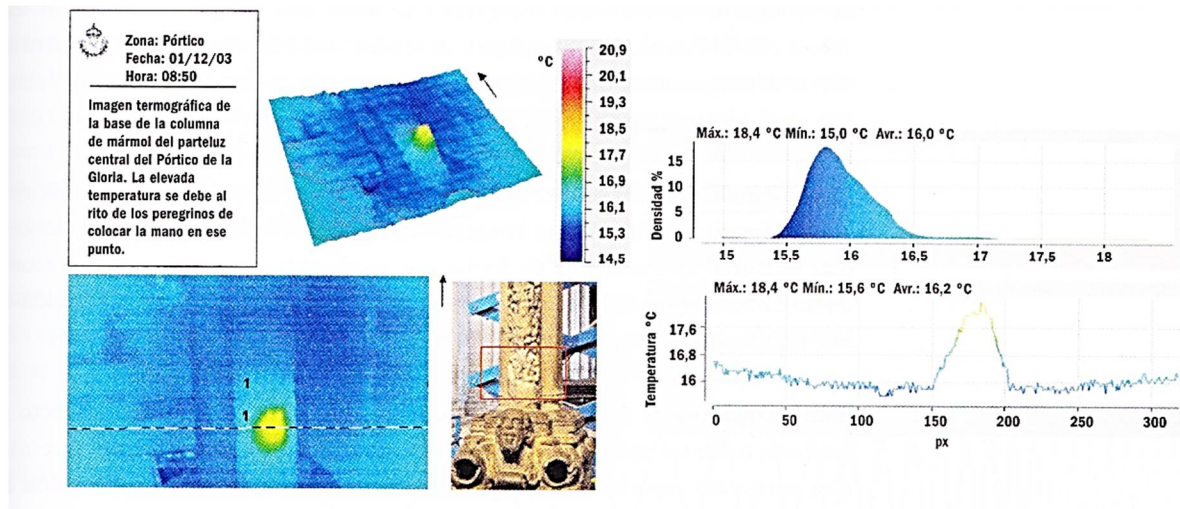


IMAGEN 173. Imagen termográfica de la columna central del Pórtico de la Gloria en la Catedral de Santiago.

Las técnicas termográficas se basan en el análisis que se realiza sobre la radiación electromagnética que refleja y/o emite todo cuerpo. La termografía es de gran sencillez de aplicación e instrumentación. Además, no es necesario el contacto para llevarla a cabo.

Dentro de la termografía se pueden distinguir a la termografía infrarroja y a la espectrorradiometría.

- **TERMOGRAFÍA INFRARROJA:** es una técnica que logra convertir la radiación térmica que emite el material (y que el ojo humano no puede captar) en señales eléctricas. Así se vuelven visibles y mensurables. Los parámetros utilizados son la emisividad y la temperatura. El equipo instrumental incluye un videograbador, que debe ser sensible a la radiación infrarroja. De este modo, las imágenes pueden verse en tiempo real e *in situ*.

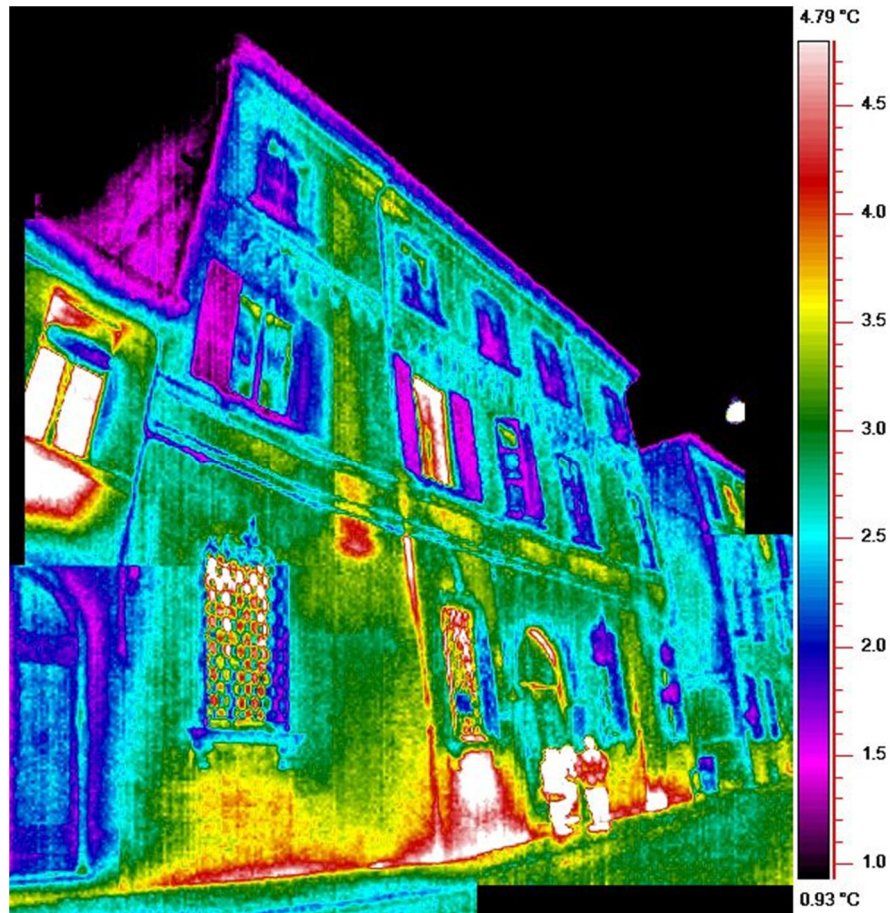


IMAGEN 174. Imagen termográfica.

- ESPECTRORRADIOMETRÍA: aunque menos utilizada, esta técnica posibilita la medición del flujo energético emitido por una fuente de radiación (o superficie donde incida). Para hacerlo, discrimina las diferentes longitudes de onda de su espectro. La espectrorradiometría es una técnica más compleja que la termografía infrarroja y además es menos inmediata. Sin embargo, sus resultados son muy precisos. Cuando la cartografía de lesiones y la litografía<sup>15</sup> se digitalizan, el trabajo se vuelve mucho más aprehensible. La DIGITALIZACIÓN DE LAS CARTOGRAFÍAS permite establecer correlaciones entre los diferentes aspectos que se consideren necesarios. Por ejemplo, se pueden extraer porcentajes de las variedades de piedras utilizadas, o de tipos de lesiones, o incluso se pueden comparar

<sup>15</sup> Técnica de reproducir mediante impresión lo dibujado o grabado previamente en una piedra caliza.  
Fuente: <http://www.wordreference.com/definicion/litograf%C3%ADa>



lesiones entre sí. La técnica instrumental a ser empleada es el proceso digital de imágenes.

Entonces, la sistematización de lo expuesto es que para la realización de la diagnosis in situ se necesita de la confección de cartografías. Estas cartografías relevan especialmente los tipos de materiales utilizados y las lesiones que pudiere haber. Para que se puedan llevar a cabo estas cartografías hay que utilizar ciertas técnicas instrumentales, como ser la fotogrametría y la termografía.

Además, la digitalización de cartografías ayuda y simplifica los análisis de

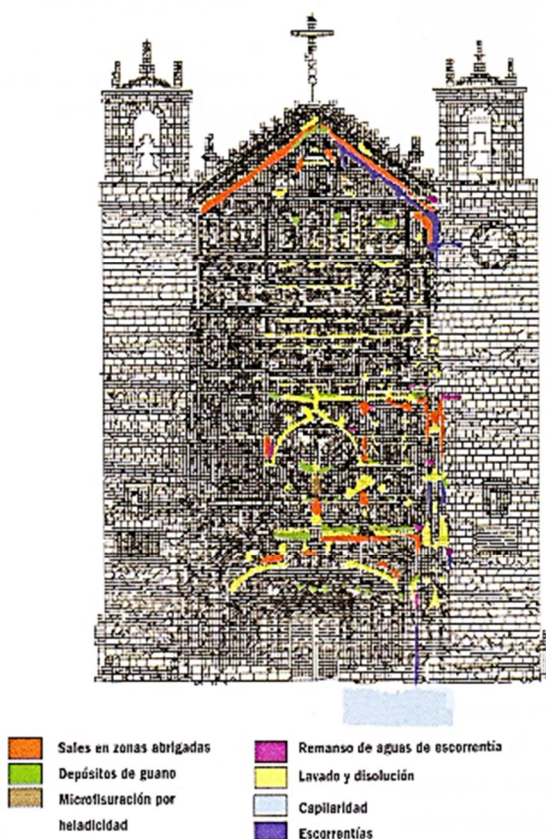


IMAGEN 175. Espectrorradiómetro.

diagnosis. No hay que olvidar que los datos climático-ambientales y de niveles y tipos de contaminación, de recopilación histórica de la construcción, etc., deben ser correlacionados con los resultados obtenidos para que la diagnosis sea acertada. La metodología de trabajo in situ y la forma en que ésta se ejecuta, son útiles para el intercambio de información entre los diferentes profesionales y técnicos que se ven involucrados frente a una intervención en las construcciones de piedras (arquitectos, aparejadores, petrólogos, restauradores).



CARTOGRAFÍA DE PROCESOS, SAN PABLO DE VALLADOLID



CARTOGRAFÍA DE DAÑOS DE LA CAPILLA DE SAN ILDEFONSO



IMAGEN 176. Ejemplo de cartografía de procesos y de daños. Iglesia de San Pablo Valladolid.

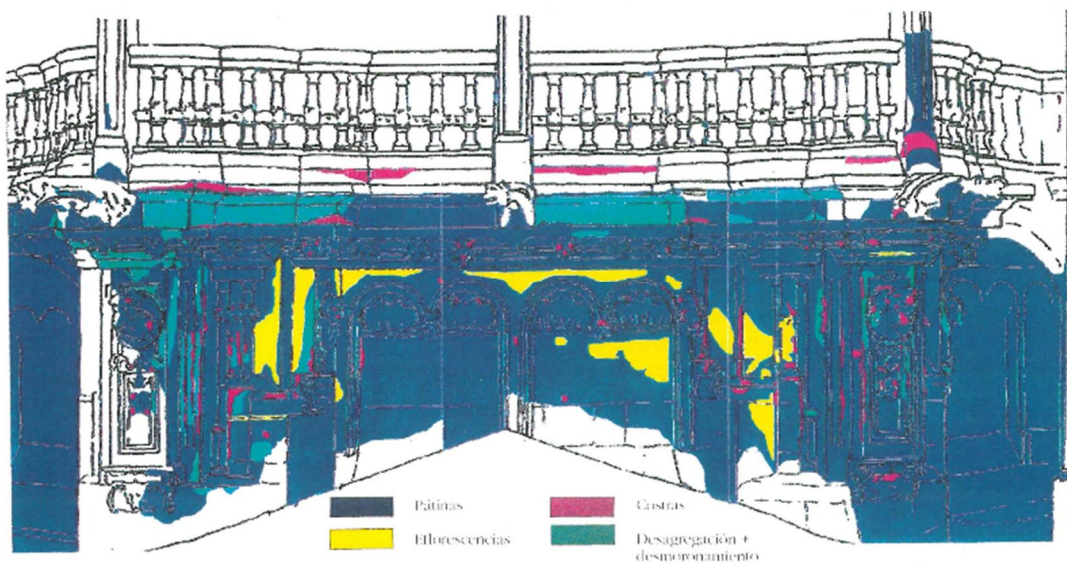


IMAGEN 177. Cartografía de lesiones en la parte baja del cimborrio de la Catedral de BURGOS.



### TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS DE DIAGNÓSTICO

Se verá en el siguiente apartado que las técnicas y ensayos para caracterizar a los materiales pétreos usados en la construcción requieren, en la mayoría de los casos, de la extracción de material y posterior obtención de probetas de ensayo. De este modo, estos procedimientos causan cambios irreparables en la naturaleza original de la construcción y de la piedra. Se conoce a estos tipos de estudios como “análisis destructivos”. La metodología de trabajo in situ propone técnicas no destructivas, que además, proporcionan una diagnosis rápida.

Por otro lado, las técnicas no destructivas permiten la repetitividad en las mediciones, son de gran eficacia y, en general, de bajo costo.

Dentro de los ensayos no destructivos se pueden mencionar a los de ULTRASONIDOS (ver también el apartado de caracterización de los materiales pétreos), las pruebas de EMISIÓN ACÚSTICA, la TOMOGRAFÍA y la TERMOGRAFÍA y también a una serie de instrumentos que registran el relieve gráfico métrico y geométrico de la estructura. Este registro se conoce como PLANIMETRÍA.

#### ULTRASONIDOS

La propagación de ondas elásticas o ultrasonidos es uno de los ensayos no destructivos más utilizados. Los resultados se basan en las variaciones que experimenta la velocidad de propagación de las ondas durante su paso por el interior del medio bajo análisis. Las técnicas de ultrasonidos permiten determinar la existencia o no de anisotropías. También, habilitan a deducir el estado de porosidad y de fisuración interna, detectar niveles de alteración y evaluar daños causados por los distintos ensayos de durabilidad. Los ultrasonidos se generan de manera artificial. Se los debe inyectar en la roca, luego hay que detectarlos, registrarlos y procesarlos. Por último, se debe determinar el parámetro físico que va a servir de base interpretativa.





IMAGEN 178. Alzados de velocidad de propagación de ultrasonidos (izda.) y de patologías (centro). En ambos casos, los daños se localizan en los paños de sebka y dinteles de las ventanas superiores. Detalle de los deterioros (dcha.) Palacio de Don Pedro I, Sevilla.

## EMISIÓN ACÚSTICA

Se puede decir que, a diferencia de los ultrasonidos, no debe ser inyectada al medio rocoso sino que se fuerza su liberación espontánea.

La emisión acústica o la ACTIVIDAD MICROSÍSMICA es una liberación repentina de energía de deformación elástica que se encuentra almacenada en la roca, cuando la piedra es sometida a tensiones.

De este modo, se generan en el interior de la piedra ondas elásticas que se propagan hacia todas direcciones. Estas ondas pueden ser captadas en la superficie de la piedra mediante transductores.

El sistema de captación, medición y registro de la emisión acústica es bastante simple. Está compuesto de un sistema de captación –el transductor– y un sistema de monitoreo que registra las señales que se detectan. Las señales de emisión acústica son muy débiles, por eso se necesita que se las amplifique.





La amplificación se logra a través de un pre-amplificador que debe ser situado cerca del transductor, o mismo dentro de él. Los ultrasonidos que son generados por actividad cultural, es decir, por el entorno de actividades humanas que rodea a la construcción, se filtran mediante un sistema que selecciona la banda de frecuencias útiles al objetivo que se persigue. Los ensayos de emisión acústica son extremadamente útiles para descubrir posibles inestabilidades mecánicas de las piedras. Esto se debe a que el fenómeno de emisión de ondas se relaciona con los procesos de deformación y rotura de las rocas.

Las emisiones acústicas, en escala microscópica, están originadas por dislocaciones, microfisuras, rozamiento de bordes de grano, maclaciones. En escalas macroscópicas, estas ondas se generan por fracturación y fricción a lo largo de discontinuidades en la piedra. En escala megascópica, se generan por rotura de grandes volúmenes de roca o por el movimiento de unidades estructurales.

Todas las escalas son importantes en la diagnosis de la construcción, tanto la microscópica, la macroscópica y la megascópica, ya que en todas se pueden plantear problemas de estabilidad: desde el basamento rocoso que sustenta el edificio hasta el sillar en el que se pueden producir las cristalizaciones de sales, desarrollándose así tensiones y fisuras locales.

La emisión acústica se mide en VELOCIDAD DE EMISIÓN ACÚSTICA, que se expresa en SUCESOS (compuestos por CUENTAS) por unidad de tiempo. Un suceso es cada uno de los cambios físicos que se producen en el material que es capaz de generar emisión acústica.

La diagnosis mediante emisión acústica es muy útil frente a problemas de inestabilidad de una construcción. Esa inestabilidad puede ser monitoreada en su evolución mediante una red de sensores.

## TOMOGRAFÍAS

Permiten la obtención de imágenes del interior de un cuerpo a partir del análisis de señales que se envían a su interior.

Estas imágenes se tratan de un conjunto de valores numéricos de una determinada propiedad física. Las señales que se envían al interior del cuerpo pueden ser ultrasonidos, rayos X o señales de radio.

Dentro de los diferentes tipos de tomografías, la TOMOGRAFÍA ULTRASÓNICA es la más útil y utilizada dentro del estudio de materiales pétreos. A través del uso de la tomografía ultrasónica se puede obtener un mapa de los valores de la velocidad de propagación de las ondas de ultrasonido en cada punto de la masa pétrea.



*IMAGEN 179. Tomógrafo ultrasónico, utilizado en este caso para el análisis de la estructura interna de un árbol.*

Este TOMOGRAMA obtenido (el mapa resultante) se interpreta en términos de fisuración, alteración, etc. La presentación gráfica de un tomograma se realiza en mapas que describen rangos de valores diferentes para una propiedad física. El tomograma, al no ser un mapa geológico, requiere de una interpretación petrofísica posterior.

La tomografía ultrasónica permite identificar zonas de fisuración y de fracturación internas no identificables a simple vista.

## PLANIMETRÍA

Esta tiene el objeto de registrar el relieve gráfico, métrico y geométrico de la estructura de la construcción. Los resultados de las técnicas planimétricas junto con los diferentes análisis que se deben realizar ayudan a efectuar un diagnóstico definitivo. Además, una planimetría bien hecha ayuda a establecer un presupuesto más exacto y una planificación y control de trabajo mejorado ante un proceso de restauración o conservación de la piedra.

La planimetría de relieve permite evaluar la entidad del movimiento estructural de una construcción. Los instrumentos que se utilizan para la planimetría de relieve son el FISURÓMETRO, el DEFORMÓMETRO, el CALIBRE ACÚSTICO y la ya mencionada FOTOGRAFETRÍA. La VERIFICACIÓN DE VERTICALIDAD también forma parte de las técnicas de planimetría.

- **FISURÓMETRO:** es un aparato calibrador que se adosa al soporte, a ambos lados de la fisura y gradúa la intensidad del proceso fisurativo. El fisurómetro sustituye a los antiguos testigos de yeso u otros materiales utilizados.



IMAGEN 180. Fisurómetro.

- **DEFORMÓMETRO:** se utiliza para detectar todo tipo de deformidades. El deformómetro mecánico está formado por una barra de metal especial, en cuyos extremos se insertan dos terminales cónicos calibrados. El deformómetro eléctrico puede hacer mediciones de 1/1000 milímetros.



IMAGEN 181. Deformómetro.

- **CALIBRE ACÚSTICO:** está constituido por un hilo fino de metal con dos terminales. Este hilo se extiende sobre la lesión y se lo estimula eléctricamente provocando su vibración. La frecuencia que así se obtiene se capta por un selenoide y se transforma en medición sobre un gráfico. La verificación de la verticalidad es una técnica que no debe ser pasada por alto. El fenómeno de variación de la verticalidad de un paramento puede estar motivado por la propia alteración de los materiales. También puede deberse a la construcción en sí misma (aunque este caso es poco frecuente) o a la cesión del terreno por cambios geológicos del mismo. Las causas atmosféricas pueden incidir en la verticalidad de un paramento, ya sea por sí mismas o en coordinación con otras causas.
- **TEODOLITO:** instrumento topográfico que define un plano vertical paralelo a la base del muro o columna. También están los **APARATOS CLINOMÉTRICOS**, que actúan adosados al plano a examinar.

### PERMEABILIDAD

La duración de un material depende, entre otras cosas, de la permeabilidad del muro soporte del que forma parte. Las infiltraciones acuosas, además de los daños que produce por la congelación de agua, puede producir otros efectos como disoluciones, sulfataciones y formaciones bacterianas deteriorantes.

Un análisis previo de la permeabilidad se puede llevar a cabo gracias a dos instrumentos: el **TUBO DE ABSORCIÓN** y la **CAJA DE PRESIÓN**.

- **TUBO DE ABSORCIÓN:** consiste en un tubo de 10 a 20 milímetros, que es curvo en su parte inferior forma de pipa. El tubo, poseedor de una escala, se llena con una cantidad de agua. Esta cantidad puede variar entre 100 y 150 milímetros. El agua queda en contacto con el muro y es absorbida por éste de manera gradual. La operación se efectúa durante un período de tiempo de 10 a 30 minutos. Una vez pasado el tiempo, se procede a la medición del agua absorbida, que queda reflejada en la escala.





IMAGEN 182. Ensayo de permeabilidad con tubos de absorción.

- **CAJA DE PRESIÓN:** es una caja que tiene una cara abierta. Esta cara abierta se pone en contacto con el muro de piedra y se separa del mismo por un cerco de goma flexible. Simultáneamente, se ejerce una presión sobre la caja mediante un peso. Esta presión debe ser constante a fines de mantener la presión hidrostática.

Hay un tubo calibrado a intervalos de 1 milímetro acoplado a la caja, que debe ser aplicado durante un período que oscila entre los 10 y los 30 minutos. Como la absorción de agua debe producirse sólo en el área en contacto con la caja, la piedra circundante debe ser tratada con algún producto hidrofugante. Este tipo de pruebas debe realizarse dos o tres veces para poder evaluar correctamente la absorción de la piedra y poder calibrar las mediciones.

<b>TÉCNICA</b>
Ultrasonidos
Emisión acústica
Tomografía (tomografía ultrasónica)
Termografía (infrarroja, de espectrorradiometría)
Planimetría
Permeabilidad
<b>TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS DE DIAGNOSIS DE LESIONES EN LAS PIEDRAS</b>



### DIAGNOSIS DE LABORATORIO

El trabajo en el laboratorio comprende distintos objetivos.

La caracterización petrofísica de las variedades de piedras que se hayan inventariado es uno de los objetivos más importantes.

También se estudia el deterioro de las piedras. Se analiza el material alterado y las diferentes pátinas. Se aplican ensayos hídricos y ensayos mecánicos. El resultado implica que se puedan identificar los agentes agresores y los mecanismos por los cuales los materiales pétreos se deterioraron.

Para investigar cómo responden los materiales pétreos bajo análisis a la agresión del medio y cómo podrían responder ante un tratamiento se necesita tener una caracterización de los mismos muy precisa.

Para ello se debe realizar una PETROGRAFÍA y se deben determinar los PARÁMETROS FÍSICOS, entre los que se encuentran los PARÁMETROS HÍDRICOS y también los PARÁMETROS MECÁNICOS, los PARÁMETROS TÉRMICOS y los PARÁMETROS DINÁMICOS.

Las determinaciones de parámetros necesitan para su realización de ciertos ENSAYOS MECÁNICOS Y ENSAYOS HÍDRICOS.

Es necesario el estudio de los minerales que presentan las rocas (MINERALOGÍA), de su modo de agregación –incluyendo los poros y las fisuras– (TEXTURA Y POROSIDAD) y de su COMPOSICIÓN QUÍMICA.

Para llevar a cabo una petrografía se hacen necesarias técnicas de MICROSCOPIA, TÉCNICAS DE CUANTIFICACIÓN Y TÉCNICAS INSTRUMENTALES DE ANÁLISIS QUÍMICO Y MINERAL.



## MICROSCOPÍA

Las técnicas de microscopía requieren esfuerzos de preparación de las muestras. Las muestras deben recogerse con especial cuidado, para no introducir efectos no deseados causados por la manipulación indebida.

Estos efectos pueden ser nuevas fisuras, saltaciones de grano, contaminación de hierro, contaminación electrónica, entre los más importantes. Las rocas que hubieren sido cortadas con sierras de alta velocidad de giro y con discos gruesos de borde continuo o discontinuo no deben tomarse en cuenta como muestra. Esto se debe a que la fisuración introducida por estos tipos de corte escondería la realidad de la roca anterior al corte.

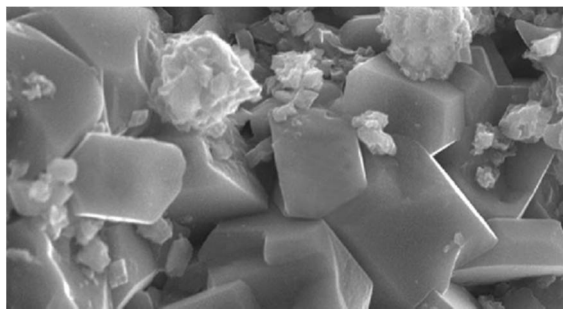
Si las superficies se hubieren obtenido mediante sierras de baja deformación son plausibles de ser utilizadas, ya que las sierras no deformantes aplican un esfuerzo mínimo sobre la zona de corte y utilizan además un disco diamantado muy delgado, que gira a menos de 100 revoluciones por minuto.

Se pueden mencionar como técnicas principales de microscopía para la caracterización petrográfica de los materiales rocosos a la microscopía óptica de polarización con luz transmitida, a la microscopía de fluorescencia, a la microscopía electrónica de barrido y a la microscopía láser confocal.

- **MICROSCOPÍA ÓPTICA DE POLARIZACIÓN CON LUZ TRANSMITIDA:** es una técnica que necesita de una lámina de piedra de 30 mm. Esta lámina debe ser colocada sobre un soporte de vidrio o portaobjetos. La utilización de la microscopía óptica de polarización permite la identificación de los minerales que constituyen a la roca. La identificación de minerales se hace a través de las propiedades ópticas que posean, del tipo de textura, de los componentes texturados (granos minerales, matriz, cemento, poros) y de sus características (tamaño, forma y distribución).

- **MICROSCOPIA DE FLUORESCENCIA:** se deben impregnar láminas delgadas de la piedra con fluoresceína y se examinan mediante luz ultravioleta. Se provoca así la excitación de fluorescencia de las zonas impregnadas. De este modo, se logran obtener imágenes del sistema poroso y fisural comunicado de la piedra en cuestión.
- **MICROSCOPIA ÓPTICA DE BARRIDO:** se realiza con pequeños fragmentos de roca o con una lámina delgada de la misma (pero sin la necesidad de un porta-objetos). Los materiales se deben metalizar con una capa fina de Au-Pd o C, para hacer conductora a la superficie de la piedra. Esta técnica tiene un poder de resolución superior a la de la microscopía óptica.

Por lo tanto, la microscopía óptica de barrido permite observar con gran



detalle los aspectos morfológicos de los poros y fisuras que sean menores a 1 mm y de las partículas sólidas de contaminación.

IMAGEN 183. Imagen obtenida con microscopio de barrido.

- **MICROSCOPIA LÁSER CONFOCAL:** es una técnica novedosa que permite la reconstrucción del sistema microfisural de una roca, pero en tres dimensiones. La reconstrucción se realiza a través de secciones “virtuales” seriadas al interior de una lámina delgada de piedra. Los cortes virtuales o secciones ópticas son imágenes de dos dimensiones, x e y, que se obtienen a diferente profundidad z, en la lámina delgada. Esta lámina debe ser preparada del mismo modo que para la utilización de la microscopía de fluorescencia, es decir, impregnada con fluoresceína.



## TÉCNICAS DE CUANTIFICACIÓN

Para la cuantificación del volumen de ocupación de los componentes minerales y de los poros en las rocas, se utilizan procedimientos estereológicos y el procesamiento digital de imágenes.

- **PROCEDIMIENTOS ESTEREOLÓGICOS:** son técnicas que cuantifican el volumen que ocupan los poros y componentes minerales de las piedras. Su utilización es sencilla, económica y simultáneamente genera resultados muy precisos. Para llevar a cabo estas técnicas de cuantificación se requieren imágenes microscópicas de la roca. Sobre estas imágenes se van a realizar las mediciones y, por lo tanto, deben ser claramente identificables en ellas los distintos componentes a ser evaluados.

Para el caso de la cuantificación de minerales las imágenes obtenidas mediante microscopía de polarización son las más útiles. Para la cuantificación de poros, las más útiles serán las imágenes obtenidas por la electrónica de barrido. En todos los casos se trabaja con una plantilla estereológica de cruces. Se puede determinar la densidad y anisotropía de las fisuras a través de la medición del número de intersecciones que tengan respecto a un recorrido de dirección perpendicular, de 10 milímetros (por ejemplo). En general, se superpone al azar sobre la imagen microscópica de la piedra a la plantilla y se cuentan las intersecciones mediante el número de cruces en cada una de las especies minerales o poros. Repitiendo este procedimiento varias veces con imágenes diferentes se puede estimar el porcentaje en volumen.

- **PROCESO DIGITAL DE IMÁGENES:** se basa en el tratamiento informático de imágenes microscópicas. Los resultados de este procedimiento son muy certeros y permiten realizar cartografías de los componentes petrográficos. Pero, al contrario de los procedimientos estereológicos, requieren de costosos equipos instrumentales.

## TÉCNICAS INSTRUMENTALES DE ANÁLISIS QUÍMICO Y MINERAL

- **FLUORESCENCIA DE RAYOS X:** es una técnica que se considera clásica, ya que es muy habitual y rápida. Se utiliza para analizar los elementos mayores y trazas en las rocas. Para realizarse requiere de una cantidad de muestra pequeña, inferior al gramo. Su límite de detección es de ppm.
- **DIFRACCIÓN DE RAYOS X:** es una técnica multielemental que sirve para la identificación de fases cristalinas. También se utiliza para el análisis semicuantitativo de los porcentajes de esas fases cristalinas que hay en la roca. La cantidad de muestra rocosa que se necesita para llevar adelante la difracción de rayos X es de unos 0,5 g pulverizada en mortero de ágata<sup>16</sup> hasta 50 mm. El error de medida del análisis semicuantitativo es del 5 %.
- **MICROSONDA ELECTRÓNICA:** también es una técnica multielemental. Se utiliza para el análisis de elementos químicos al interior de un mineral visualizado gracias a la microscopía óptica de barrido. La microsonda electrónica permite analizar muestras muy pequeñas, con un límite de detección de 10-100 ppm. Además, permite la realización de perfiles de variación de un elemento químico o la cartografía de su distribución cuantitativa en el seno de un mineral. Es por esto que es de gran interés para el análisis cuantitativo de elementos que se encuentran en rocas y minerales, especialmente elementos mayores y menores.
- **MICROANÁLISIS POR ENERGÍA DISPERSIVA DE RAYOS X:** necesita que se acople un detector de rayos X a un microscopio electrónico de barrido. Así, se podrán realizar mediciones análogas a la técnica de microsonda electrónica (análisis de elementos químicos y realización de perfiles de

---

<sup>16</sup> El ágata no es un mineral específico, sino un conjunto de variedades microcristalinas del cuarzo (sílice). Fuente:

[http://www.gemstone.org/index.php?option=com\\_content&view=article&id=137:sapphire&catid=1:gem-by-gem&Itemid=14](http://www.gemstone.org/index.php?option=com_content&view=article&id=137:sapphire&catid=1:gem-by-gem&Itemid=14)



variación química). Es muy utilizada para el análisis de material alterado coherente y de partículas sólidas de contaminación.



## 4. TRATAMIENTO

Cuando se plantea la necesidad de realizar un tratamiento sobre las construcciones pétreas siempre se hace necesaria una etapa de diseño previo del mismo. Para llevar a cabo el diseño del tratamiento, todos los datos relevados en el período de diagnóstico deben conjugarse de la mejor manera, para poder construir hipótesis de trabajo válidas y eficientes, según el resultado que se quiera lograr.

La historia de los tratamientos sobre los materiales rocosos muestra cómo las concepciones de intervención han ido variando.

Ejemplo de esto es que hasta el siglo XIX existía un gusto muy desarrollado por la policromía sobre las piedras. A partir de finales de ese siglo, este gusto desaparece y comienza a incrementarse el interés por la piedra desnuda, en una especie de “regreso a lo auténtico”. Esto representó un cambio radical de la moda, que, junto con los avances tecnológicos y la producción de nuevos materiales, generó una evolución en las formas de elaborar las construcciones.

Así, en cuanto al tratamiento sobre los materiales pétreos, se condenó todo lo que tapara a la piedra, sustituyendo la función tecnológica de los estucos como sistemas de protección por productos traslúcidos aisladores que no ocultan la imagen del muro en crudo.

En este momento, la intervención sobre las piedras de edificación está contemplada dentro del marco de la carta de Venecia, de 1968.

Allí se establece que todas las etapas y procedimientos empleados deben intentar que la piedra conserve su aspecto original. Se estipula también que no se deben introducir variables que puedan modificar el objetivo artístico y/o estético que los ejecutores de la obra hayan querido plasmar.

El criterio que se utiliza actualmente para las intervenciones sobre los materiales rocosos es el criterio del “restaurador”, que sin embargo no deja de lado totalmente las consignas de “conservar”, de “rehabilitar” y de “recrear”.





Una cuestión muy importante antes de comenzar un tratamiento de intervención sobre la piedra es tener en claro que cada obra plantea una problemática diferente y debe ser tratada de forma individualizada.

Las obras de piedra presentan problemáticas diferentes porque varían en los tipos de piedras empleadas, en la localización, en las pátinas que presentan (sean estas pátinas naturales o artificiales), en los recubrimientos originales y policromías y, sobre todo, en su estado de conservación o deterioro.

Una de las finalidades más imperiosas de los trabajos de intervención sobre las rocas es la de interrumpir los procesos de deterioro que se producen a través del tiempo, debidos a factores o causas que también varían de una construcción a la otra.

Para establecer el tratamiento adecuado, se parte de una hipótesis acerca del método más indicado para llevar a cabo el proceso de intervención. La hipótesis se basa en la información obtenida a partir de los estudios de diagnóstico. Esta hipótesis de trabajo debe ser contrastada y modificada posteriormente, tratando muestras en el laboratorio y efectuando ensayos sobre zonas piloto, que deben ser seleccionadas de forma muy cuidadosa.

El estudio del método de intervención más adecuado debe finalizar en el proceso mismo de la intervención.

Esto quiere decir que es un estudio que no termina de cerrarse, ya que durante las propias labores de intervención suelen presentarse problemas no previstos. Algunos de esos problemas pueden ser la aparición de materiales que no estaban estudiados e identificados –por permanecer ocultos bajo capas de suciedades– o reacciones imprevistas del material bajo tratamiento, entre las más comunes.

La piedra es un material muy heterogéneo, de manera que existe siempre la posibilidad de variaciones importantes en la textura y porosidad dentro de la misma construcción.

Por todo esto se hace necesario un control técnico permanente de las labores de intervención que se efectúan. Además, estas labores deben ser llevadas a cabo por personal especializado e idóneo para la tarea.



Otro aspecto a tener en cuenta es el de las prioridades en la intervención. Se debe considerar en primer lugar la atención a las causas de deterioro. Se debe intervenir sobre estos factores para erradicarlos o minimizarlos lo más posible. Luego, se lleva a cabo la intervención sobre la piedra propiamente dicha.

En general, se pueden establecer ciertas etapas en la intervención sobre los materiales pétreos. Las etapas son:

<b>LIMPIEZA</b>	<b>Métodos húmedos</b>	Chorro de agua a presión Lluvia de agua Agua nebulizada Vapor de agua Agua en compresas Agua atomizada
	<b>Métodos mecánicos</b>	Limpieza manual Chorro de arena Microchorro de arena
	<b>Métodos químicos</b>	Productos alcalinos Productos ácidos Productos orgánicos
	<b>Otros métodos</b>	Rayos láser Ultrasonidos
<b>CONSOLIDACIÓN</b>	<b>Consolidación estructural</b>	Tirantes Cordadas Planchas Inserciones metálicas Grapados Consolidación de cimientos
	<b>Consolidación superficial</b>	Productos inorgánicos Productos orgánicos Productos combinados (orgánicos-inorgánicos)
<b>TRATAMIENTOS DE LIMPIEZA Y CONSOLIDACIÓN</b>		

## 4.1. LIMPIEZA

La intervención sobre los materiales pétreos comienza por la liberación de la superficie de las rocas de suciedades y elementos extraños. Lo mismo hay que hacer con sus poros. Las piedras acumulan polvos y suciedades de naturaleza diversa, pero fundamentalmente procedentes de las atmósferas contaminadas. También se juntan en las superficies de las piedras y en el interior de sus poros sales solubles, algunas incrustaciones duras, restos de antiguos tratamientos, vegetación y microorganismos.

Como se ha visto en apartados anteriores, esta acumulación de orígenes diversos causa y acelera los procesos de deterioro de las piedras. Desde la partícula de polvo más hasta los cambios químicos y mecánicos que se propician en el interior de los poros por fenómenos externos, por capilaridad, condensación o por causas biológicas, contribuyen a la destrucción y a la degradación lenta de las construcciones pétreas. El objetivo primordial de la limpieza es el de devolver a la construcción el aspecto más cercano al que tenía originalmente.

El procedimiento más conveniente para enfrentarse a un tratamiento de limpieza es el de realizar catas o muestreos previos de estas suciedades para observarlos y determinar su naturaleza. Este procedimiento es muy útil, y de no haberse realizado durante la diagnosis es importante su consecución en esta etapa.

En cuanto a los métodos de limpieza, los requisitos que hay que tener en cuenta son:

- LA ACCIÓN DEL LIMPIADOR DEBE SER LENTA. De este modo, el operario a cargo puede controlar los efectos que produce.
- EL MÉTODO ELEGIDO NO DEBE GENERAR PRODUCTOS DAÑINOS para la conservación de las rocas.
- EL MÉTODO ELEGIDO NO DEBE PRODUCIR ABRASIONES FUERTES, microfracturas o modificaciones en la superficie de la piedra, ya que esto facilitaría su deterioro posterior al tratamiento.

Pero antes de comenzar la limpieza en sí misma, existen dos procesos que se deben realizar en esta etapa, de ser necesarios. Ellos son la PRECONSOLIDACIÓN y la DESALINIZACIÓN.

### PRECONSOLIDACIÓN

A veces, el equipo de intervención encuentra que existen superficies de alto valor artístico o histórico, patinadas o esculpidas, que presentan un grado de deterioro muy serio. Este deterioro podría provocar la destrucción de la superficie misma durante el período de limpieza. Entonces, se hace necesario realizar una consolidación de la superficie antes de comenzar a limpiarla.

Los métodos que se emplean para la preconsolidación son análogos a los de la consolidación, que estudiaremos en este apartado.

La preconsolidación tiene la desventaja de fijar la suciedad presente en la superficie. Por eso, se hace necesario efectuar una preconsolidación ligera seguida de una limpieza ligera. Este proceso debe ser repetido tantas veces como sea necesario.

### DESALINIZACIÓN

Como se ha mencionado repetidas veces, la presencia de sales solubles en las rocas constituye una de las causas más importantes de deterioro de las piedras de construcción. Cuando los cristales resultantes de los procesos de hidratación y cristalización de estas sales se ubican en el espacio poroso de las piedras contribuyen con las tensiones que generan a que surjan microfisuras. Incluso, pueden llegar a disgregar la roca.

El primer paso es el de analizar las sales que se encuentran presentes en las rocas. Una vez que las condiciones termodinámicas que controlan la formación de sales se esclarecen, se debe actuar con el objetivo de evitar su formación. Para lograr que las sales no se vuelvan a generar, se deben despejar las incógnitas acerca de sus orígenes, es decir, de las fuentes implicadas en su generación. Estas fuentes pueden ser el agua (procedente del suelo o de las lluvias), la contaminación ambiental o los morteros. Esta investigación también está incluida en la etapa de diagnóstico.

El procedimiento de desalinización consiste en la extracción de las sales solubles de la piedra. Pero este proceso no es sencillo. Un procedimiento base utilizado para la extracción de sales consiste en la aplicación sobre la superficie de la piedra de un





material absorbente. Este material puede ser pasta de celulosa. El material absorbente debe estar embebido en agua destilada.

La aplicación debe durar el tiempo que sea necesario para solubilizar las sales. Evidentemente, estos tiempos son bastante conocidos porque en la etapa de diagnosis ya se deben haber despejado las naturalezas químicas de las sales presentes. El apósito con la aplicación de pasta se debe mantener cubierto con una capa de polietileno durante todo el tiempo que dure la fase.

Después se debe retirar el polietileno y se deja secar. La fase que sigue es la de dilución de la pasta en agua destilada para determinar la concentración de sales presentes con un CONDUCTIVÍMETRO. La operación de extracción se debe repetir tantas veces como sea necesario hasta que se pueda comprobar que las sales solubles han sido extraídas de la piedra por completo, es decir, cuando la solución deja de ser conductora.

En lugar de pasta de papel, el soporte de la prueba puede ser SEPIOLITA o ATAPULGITA. Si el objetivo de la desalinización son las costras duras con sales, se pueden utilizar aditivos, como el EDTA<sup>17</sup>, el bicarbonato de sodio, el bicarbonato de amonio o el carbonato de amonio.

Otros métodos de desalinización que se comenzaron a utilizar en los últimos años son el vacío, la electrodiálisis, las microondas y las bacterias sulforreductoras. Sin embargo, los resultados de estos métodos están menos contrastados.

---

<sup>17</sup> *Ácido etilendiaminotetraacético.*

A continuación mediante imágenes veremos un proceso de desalinización en una fachada en fábrica de ladrillo de la Catedral del Salvador de Zaragoza. Pese a no ser un muro de piedra la desalinización es análoga a la de una fábrica de ladrillo.

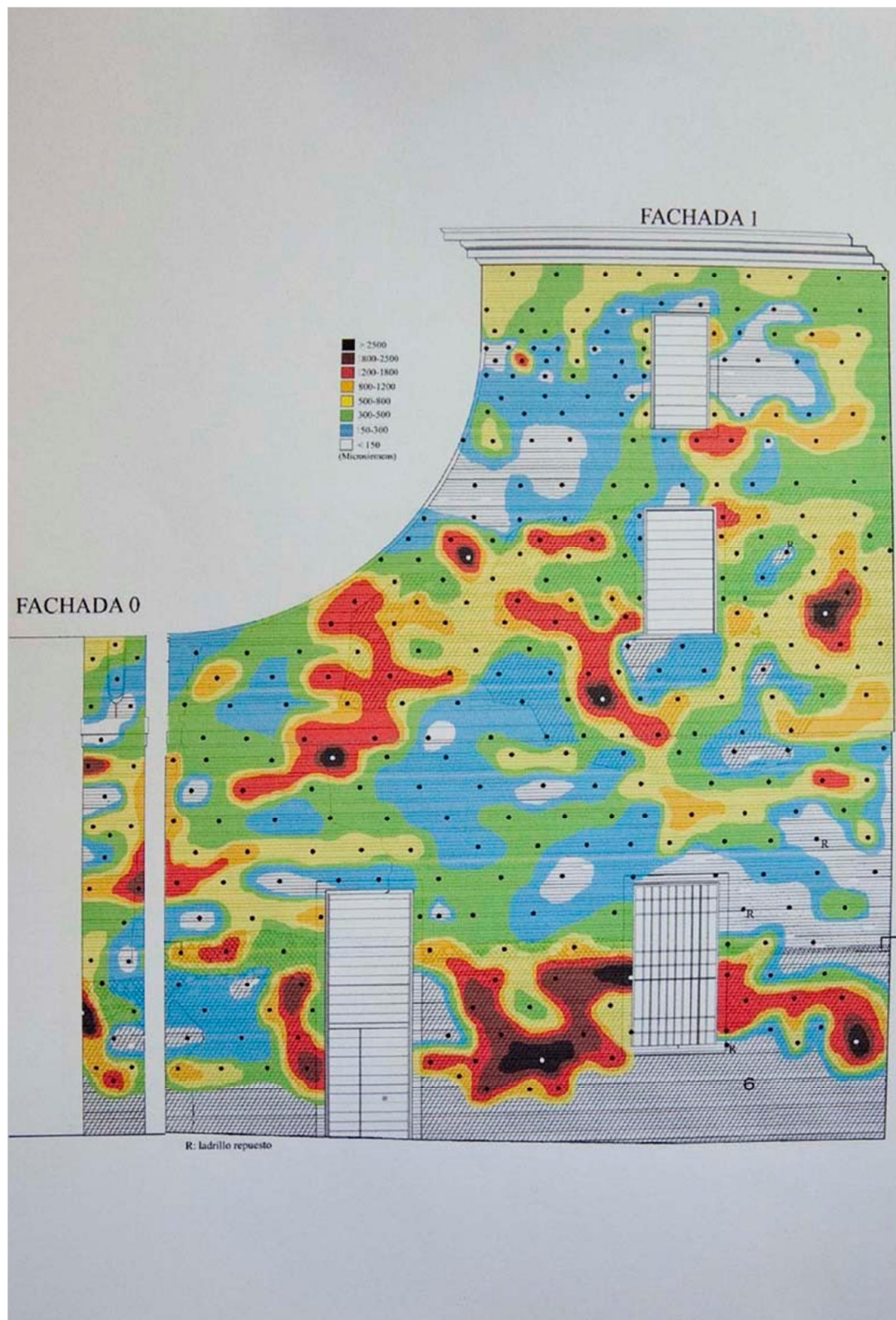


IMAGEN 184. Cartografía de daños (presencia de sales) en la Catedral del Salvador de Zaragoza.



*IMAGEN 185. Con ayuda de una pistola, se proyecta la pasta de celulosa, todavía húmeda. Pasados diez minutos, se retira el material para aplicar un segundo apósito que realiza una limpieza en profundidad.*



*IMAGEN 186. Medición de la concentración de sales.*





*IMAGEN 188.Retirada del material aplicado para lograr la desalación.*



*IMAGEN 187.Cristalización de las sales.*



Una vez hemos aplicados las debidas técnicas de preconsolidación y desalinización podemos proceder con los distintos métodos de limpieza, clasificados en:

- MÉTODOS HÚMEDOS
- MÉTODOS MECÁNICOS
- MÉTODOS QUÍMICOS
- OTROS MÉTODOS

### MÉTODOS HÚMEDOS

Los métodos húmedos de limpieza de las construcciones de piedra sacan ventaja de la acción disolvente del agua sobre los componentes hidrosolubles que caracterizan a la suciedad. El elevado poder disolvente del agua, además de eliminar las sustancias solubles, contribuye a la eliminación de las partículas carbonosas o bituminosas adheridas a la superficie rocosa, lo que favorece la durabilidad de la piedra.

La limpieza con agua es la forma más sencilla, y muchas veces la mejor, para la limpieza de la superficie de las piedras. Sin embargo, se deben tomar ciertas precauciones. Por ejemplo, se debe mantener la cantidad de agua utilizada dentro de límites prudenciales para evitar la posibilidad de penetración en el interior de las piedras, a través de juntas abiertas o de resquebrajaduras.

Las grapas y los elementos de fijación metálicos, que generalmente se encuentran fuera del alcance de la lluvia, pueden oxidarse y generar manchas. Si la limpieza se realiza sobre placas, y la piedra es solidaria con el muro posterior –y ambos son porosos– pueden llegar a incorporar suficiente cantidad de agua como para producir manchas y podredumbres en el interior.

Además, si la limpieza se realiza durante la época invernal, hay que tener muy en cuenta los riesgos de heladas. La limpieza húmeda busca acumular la suciedad mediante el agua para terminar de sacarla luego a través de operaciones de fregado, rascado o cepillado. Los cepillos a ser utilizados deben tener pelos metálicos pero no férricos, es decir, de acero inoxidable. Los pelos también pueden ser de madera. El agua que se suele emplear en los métodos húmedos de limpieza es agua corriente, pero destilada o reciclada mediante resinas intercambiadoras de iones.

Los métodos de limpieza que se basan en la acción del agua son:

- CHORRO DE AGUA A PRESIÓN
  - LLUVIA DE AGUA
  - AGUA NEBULIZADA
  - VAPOR DE AGUA
  - AGUA APLICADA CON APÓSITOS
  - AGUA ATOMIZADA
- 
- LIMPIEZA POR APLICACIÓN DE CHORRO DE AGUA A PRESIÓN

El método de limpieza por aplicación de chorro de agua a presión sólo debe ser utilizado sobre las superficies pétreas que presentan una cohesión buena. No debe utilizarse este método sobre aquellos materiales pétreos muy descohesionados, ya que podría verse agravado el problema notablemente. Sobre la superficie sólida rocosa se debe aplicar un chorro de agua a presión. Esta aplicación se realiza durante y despegue de la capa de suciedad adherida a la superficie rocosa. De este modo, el material soluble que estaba formando parte de la capa de suciedad, se lava.

El segundo paso para la limpieza consiste en el cepillado de los restos de costra que pudieran quedar sobre la superficie rocosa.

Se debe utilizar la menor cantidad posible de agua, especialmente si la limpieza se realiza sobre rocas porosas. Además, hay que tener cuidado con las temperaturas frías en el momento de la limpieza, ya que se recomienda evitar los efectos de las heladas. Ya se ha hablado de los peligros que pueden ocasionar las

Aguas congeladas, que generan tensiones internas en las rocas debidas a incrementos de volumen, que pueden llegar a originar microfisuras y grietas.

La limpieza con chorro de agua a presión es muy efectiva en la eliminación de costras con sales solubles, especialmente sobre piedras calizas. Sin embargo, no resulta tan eficaz sobre piedras que presentan costras muy gruesas.

Puede utilizarse de igual manera, en este tipo de limpieza, agua a baja presión (de 2 a 3 atmósferas como máximo).

- LIMPIEZA POR APLICACIÓN DE LLUVIA DE AGUA

El método de limpieza por APLICACIÓN DE LLUVIA DE AGUA consiste en el rociamiento con agua de la superficie de la piedra. El rociamiento se debe hacer durante el tiempo necesario para que se reblandezcan los depósitos superficiales acumulados de suciedad.

Se deben realizar aplicaciones sucesivas de lluvia de agua. Una vez culminado el ciclo de lluvia de agua, hay que cepillar y enjuagar para terminar la remoción del material que pudiera quedar sobre las superficies rocosas.

El método de aplicación de lluvia de agua requiere de mucha cantidad de agua. Esto puede producir efectos no queridos sobre las piedras. La gran cantidad de agua posibilita que haya mayor probabilidad de que se produzcan infiltraciones de humedades en el interior de las rocas.

Además, el agua puede contener sales solubles que quedarían alojadas en el seno de los materiales pétreos, depositadas allí por el proceso de evaporación de agua. Al igual que con el método del chorro de agua, la aplicación de lluvia de agua se debe restringir durante las épocas de bajas temperaturas.

- LIMPIEZA POR APLICACIÓN DE AGUA NEBULIZADA.

El método de limpieza por APLICACIÓN DE AGUA NEBULIZADA requiere de la utilización de nebulizadores o atomizadores. Estos instrumentos

posibilitan que la utilización de la cantidad de agua sea mínima, pero, a su vez, logrando el máximo efecto de limpieza.

El objetivo de un nebulizador es la reducción del agua a niebla. La niebla está constituida por gotas de agua muy finas, cuyo diámetro varía entre 80 y 120 micras y que cubre una superficie específica muy grande. Estas gotas se depositan sin presión externa sobre la piedra.

Así, las gotas de niebla –gracias a su elevado número y a su gran superficie específica– presentan una gran cantidad de puntos de contacto con la superficie pétreo. Un nebulizador estándar tiene una capacidad baja, de aproximadamente 1 mm/s. Sin embargo, esta capacidad es la adecuada para limpiar objetos de dimensiones acotadas. Los nebulizadores con dimensiones mayores pueden utilizarse para la limpieza de superficies grandes.

La aplicación de agua nebulizada es especialmente útil para la disolución de costras negras. Las nubes de agua se pueden orientar a las partes con difícil acceso. Esto se logra porque las nubes están fuertemente dispersas en el aire.

Además, su acción se puede dirigir hacia áreas puntuales, dejando intocadas otras partes que requieren limpieza con métodos diferentes.

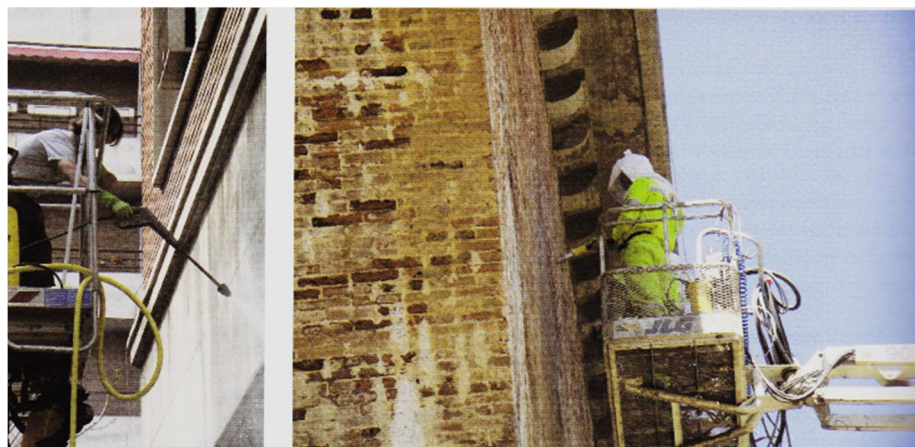


IMAGEN 189. Limpieza mediante agua nebulizada a alta presión.



Este método no puede ser aplicado en rocas que presenten bajo nivel de cohesión entre sus componentes.

- LIMPIEZA POR APLICACIÓN DE VAPOR DE AGUA.

Para la realización de la limpieza por aplicación de vapor de agua se necesita de una caldera generadora de vapor.

Ese vapor se aplica a la piedra con una presión de  $0,5 \text{ Kg/cm}^2$ . El problema con este método es la temperatura que presenta el vapor de agua. Las piedras sobre las que se aplique el vapor de agua deben ser capaces de resistir altas temperaturas. Además, las piedras bajo limpieza tampoco

deben ser proclives a retener vapor en forma excesiva, ya que se podrían generar eflorescencias.

La limpieza con vapor de agua se debe utilizar sobre piedras de construcciones que no tengan gran valor artístico. De este modo, no se suele utilizar en la limpieza de monumentos por sus efectos nocivos sobre la superficie.



IMAGEN 190. Máquina de limpieza con vapor de agua.

- LIMPIEZA POR APLICACIÓN DE APÓSITOS ARCILLOSOS CON AGUA

La limpieza mediante la aplicación de apósitos embebidos en agua es bastante simple. Se deben embeber en agua los apósitos de materiales absorbentes. Las compresas son en general de sepiolita o atapulgita.

También se pueden utilizar como material de apósito los filosilicatos hidratados de magnesio y aluminio del grupo de la paligorskita.

La ventaja de utilizar este tipo de compresas es que se pueden aplicar sobre una gran superficie específica. De este modo, pueden absorber grandes cantidades de agua en relación con su peso, ya que el agua ocupa los espacios vacíos de la estructura. Así, un kilo de atapulgita puede llegar a absorber sin hincharse un kilo y medio de agua.

El procedimiento de limpieza consiste en la aplicación de la pasta compuesta por arcilla y agua. La pasta debe tener un mínimo de dos centímetros de espesor. La aplicación se realiza durante un período de tiempo variable.

En el momento en que la pasta presenta signos de comenzar a agrietarse, se la debe remover mediante el uso de una espátula. Luego hay que proceder a aclarar con agua destilada.

Frente a aplicaciones de pasta prolongadas, es conveniente cubrir la sección tratada con polietileno. Esto tiene por finalidad la disminución de la velocidad de evaporación del agua.

La aplicación de apósitos embebidos en agua constituye un método de limpieza que produce muy bajos niveles de agresión en las piedras. Esta es la razón por la que está aconsejado para la limpieza de objetos delicados.

Por otro lado, su costo no es muy alto y su metodología de aplicación es bastante simple. Las desventajas que presenta este método de limpieza se encuentran en la lentitud para la obtención de resultados, y en que no es un método que permita altos niveles de control. Además, no posee demasiada eficacia en el tratamiento de costras gruesas. La limpieza por aplicación de compresas se suele utilizar en estatuas, relieves y frescos, especialmente aquellos que se encuentran al interior de las

construcciones. Esto se debe a que su eficacia es máxima para la disolución de costras de débil espesor (de hasta 1 milímetro).

Si este método fuera utilizado para la eliminación de costras más gruesas ubicadas al exterior de una construcción pétreo, se debería repetir demasiadas veces el número de aplicaciones, por lo que el tiempo necesario sería excesivo.

- LIMPIEZA POR APLICACIÓN DE AGUA ATOMIZADA

La limpieza por aplicación de agua atomizada se basa en la creación de un ambiente saturado de humedad.

Para lograr este tipo de ambiente, se proyecta un mínimo caudal de agua desmineralizada a través de boquillas con paso milimétrico y a presión. La finalidad de esta metodología es la de alcanzar las zonas de la construcción a las que no llega el agua de lluvia, por lo que no se alcanzan a lavar naturalmente. El lavado se debe realizar continuamente durante un período de tiempo prolongado. La finalidad es la de posibilitar la disolución de las capas de suciedad.

Las superficies tratadas deben terminar de limpiarse con la ayuda de brochas suaves.



IMAGEN 191. Desionizador de agua de la red para limpieza de agua nebulizada o atomizada.

La limpieza por aplicación de agua atomizada se realiza sobre acumulaciones de suciedad, que toman forma de costra dura con varios milímetros de espesor. Estas acumulaciones se suelen encontrar en resquicios como oquedades, gárgolas, capiteles o bajos de frisos y cornisas, lugares donde la limpieza natural de la lluvia y del viento no puede acceder. La eliminación de las costras que se producen allí es decisiva porque éstas deforman y embotan la piedra. Pero además, tapan los poros, provocando que la piedra deje de transpirar y ocasionando la posible carbonatación, con los consiguientes desprendimientos y pérdida de material.

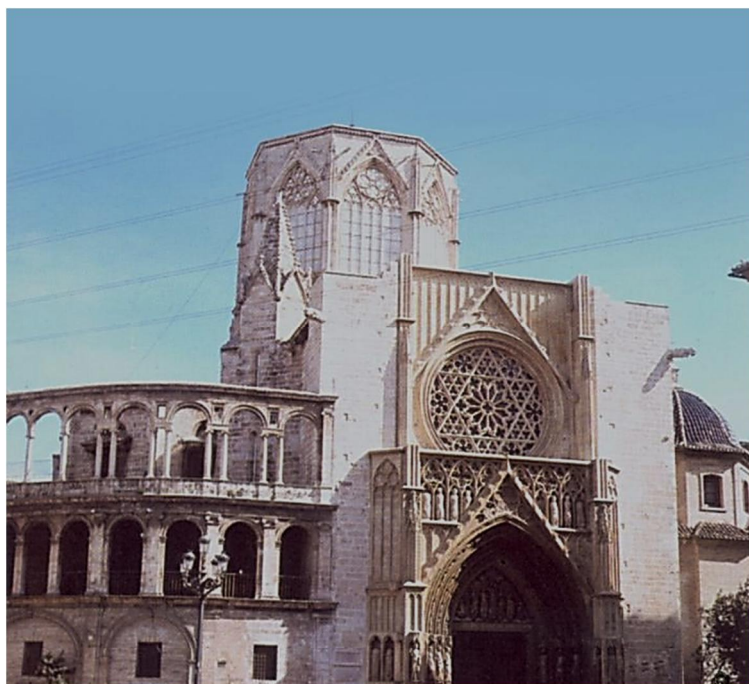


IMAGEN 192. Limpieza mediante agua nebulizada con difusores.

Se puede considerar al agua atomizada como un tratamiento inocuo para la piedra, siempre que se tomen las debidas precauciones. Entre las precauciones que se deben tomar hay que mencionar el sellado previo de las fisuras y de los bloques, la protección de elementos inferiores y el control del caudal de agua máximo admisible.

Además, no debe ser utilizado en piedras muy porosas o con recubrimientos de yesos o policromías.





*IMAGEN 193. Portada de Los Reyes de la Catedral de Palencia, cuya limpieza estaba prevista con láser, se limpió con agua nebulizada, con un coste y tiempo notablemente inferiores, y sin el riesgo de dañar las patinas que el láser implicaba. Izquierda, antes de la limpieza; derecha, resultado tras la misma.*

### MÉTODOS MECÁNICOS

La limpieza mecánica implica como su nombre lo dice, la energía mecánica utilizada para remover la suciedad del material rocoso. La remoción de suciedades debe ajustarse a los lugares exactos de interfase suciedad-piedra para que la acción mecánica no tenga consecuencias nocivas en las rocas bajo tratamiento.

Los métodos de limpieza mecánica tienen la ventaja de no introducir humedades adicionales en las piedras. Por lo tanto, los métodos secos siempre son preferibles en la medida en que puedan ser utilizados.



IMAGEN 194. Limpieza con microcincel.

Las herramientas y maquinarias a utilizar dentro de la limpieza mecánica permiten un mayor control manual y requieren el contacto más directo con la piedra. Las herramientas van desde el más diminuto trepano de retoque hasta la cabeza pesada de carborundum (carburo de sílice), pasando por las bujardas, los cepillos de todo tipo, de cerdas o púas metálicas, las piedras y lavas volcánicas y los discos giratorios abrasivos.

Se pueden mencionar entre los métodos de limpieza mecánicos:

- MÉTODO SIMPLE
- CHORRO DE ARENA

- MÉTODO SIMPLE DE LIMPIEZA MECÁNICA

Cuando se habla de método simple de limpieza mecánica, la referencia se hace especialmente a la limpieza MANUAL. El procedimiento de limpieza manual consiste en la eliminación artesanal de toda la acumulación de suciedad que se ha ido depositando durante el paso del tiempo sobre la superficie de las piedras. Los elementos que producen suciedades pueden ser líquenes, excrementos de animales, polvo, morteros viejos, hierros oxidados, etc.



IMAGEN 195. Limpieza con bisturí.

Para efectuar la limpieza manual se utiliza instrumental sencillo, como ser bisturís, papel de lija, piedra pómez, raspones y espátulas, según sean los restos que se pretende eliminar. También existen pequeños instrumentos eléctricos, como los tornos con puntas que son perfectamente controlables.

La limpieza manual puede funcionar como limpieza previa, indispensable antes de la aplicación de cualquier otro producto o método de limpieza. Además, el método de limpieza manual



IMAGEN 196. Limpieza manual.

supone una revisión detallada de la naturaleza de la suciedad, lo que permite enfocar definitivamente las líneas de actuación.

Evidentemente, la eficacia de la limpieza manual está directamente relacionada con la destreza del operario a cargo. Este método de limpieza es muy lento y delicado, por lo que se aplica en general a objetos pequeños de elevado valor.

- **MÉTODO DE LIMPIEZA MEDIANTE LA APLICACIÓN DE CHORRO DE ARENA**  
La limpieza mediante la aplicación de CHORRO DE ARENA aprovecha el poder abrasivo de este material. La acción mecánica depende de la presión del chorro de arena, de su dureza y densidad y de la forma de las partículas abrasivas que lo componen. El tiempo de aplicación del chorro de arena y la distancia entre la boquilla y la superficie de la piedra son también elementos de los que dependen los resultados que se obtienen por la utilización de este método de limpieza.

El chorro de arena se puede utilizar seco o húmedo. En el caso del CHORRO DE ARENA HÚMEDA la metodología consiste en la aplicación de una mezcla de arena y agua. La presión a la que se expide la mezcla varía entre los 0,5 y los 3 Kg/cm<sup>2</sup>. La operación con chorro de arena húmeda no origina polvo contaminante del medio ni dañino para el ejecutor de la limpieza. El chorro de arena húmeda no está recomendado para su utilización en piedras con valor artístico. Esto se debe a que la cantidad de agua que se utiliza podría movilizar sales solubles en los paramentos. Esto, como se ha dicho anteriormente, puede originar cristalizaciones de sales con las sabidas consecuencias que podrían traer.

Por otro lado podemos aplicar este mismo método usando un MICROCHORRO DE MATERIAL ABRASIVO. Este se trata de un polvo



abrasivo fino que, con respecto al chorro de arena, es de dureza y tamaño menor.

Para aplicar el chorro se utilizan instrumentos adecuados que funcionan con aire comprimido (aeroabrasivos). Los abrasivos utilizados pueden ser pequeñas esferas de vidrio o de alúmina. El diámetro aproximado de las esferas es de 40 micras.

La presión del chorro se puede regular fácilmente, al igual que la cantidad de abrasivo utilizado. Por lo tanto, esta clase de limpieza por su alto nivel de control, se puede aplicar a cualquier tipo de piedra.

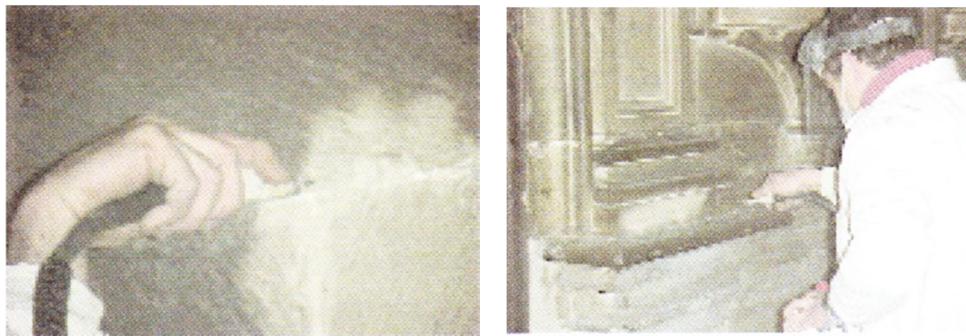


IMAGEN 197. Limpieza con microchorro en el interior de la catedral de Logroño.

Sin embargo, es especialmente efectivo para la eliminación de incrustaciones gruesas y duras, costras finas o depósitos y costras negras que cubren la piedra con policromía. Esto se debe a que el microchorro



IMAGEN 198. Limpieza mediante microchorro de arena. Antes y después.

puede limpiar superficies pétreas dañadas respetando las pátinas cromáticas originales que se encuentren bajo la capa de suciedad.

Sin embargo, este método desprende mucho polvo. El polvo originado en la aplicación de microchorro de arena debe ser recogido con el fin de evitar la contaminación.

Los aparatos que se utilizan para la aplicación del microchorro limpia dor son costosos y difíciles de mantener. Además, el costo de los abrasivos es elevado y el método es lento, ya que se logran limpiar algunos cm<sup>2</sup> por hora.

### MÉTODOS QUÍMICOS

Los tratamientos que utilizan productos químicos para realizar la limpieza de las piedras son los menos inofensivos, es decir, los que mayor daño causan a las piedras. Esto se debe a que, si los productos químicos no son utilizados con precaución, pueden provocar daños en el material base.

Además, los daños resultantes de la aplicación de compuestos químicos no se aprecian inmediatamente. Por lo tanto, no se puede realizar una actuación pronta de recuperación sino que hay que esperar para evaluar los daños un cierto tiempo, y eso hace que sea ya tarde para intervenir.

La aplicación de productos químicos puede ser de productos:

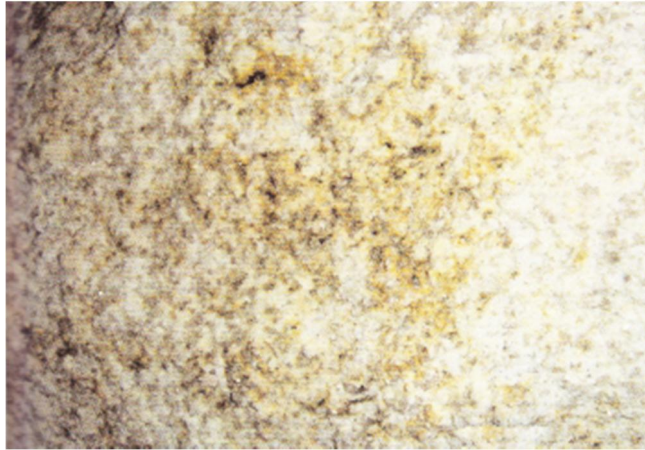
- ÁCIDOS
- ALCALINOS
- SOLVENTES ORGÁNICOS
- BIOCIDAS

- **AGENTES ÁCIDOS:** se aplican para este tipo de limpieza química y pueden ser ácidos o sales ácidas. Los ácidos y las sales ácidas reaccionan con las costras negras y las disuelven. La mayoría de los productos existentes en el mercado se basan en el fluorhídrico. Por eso se deben diluir en agua en concentraciones bajas y muy cuidadosamente.

De no seguirse este procedimiento, se pueden originar grandes complicaciones en relación a su manipulación. El peligro para el operador de los ácidos es importante. Las soluciones acuosas no apropiadas pueden ocasionar serias quemaduras. Estas soluciones pueden, incluso, pasar a la sangre a través de la piel, produciéndose envenenamientos. En la atmósfera próxima ataca a los ojos y a las vías respiratorias. Estas son las razones por las que las normas de seguridad relativas al personal deben ser tenidas muy en cuenta.

Los operarios requieren indumentaria especial desde los pies a la cabeza, e incluso deben estar provistos de oxígeno o de aire no contaminado. El ácido fluorhídrico es el único agente no productor de sales solubles, aunque es muy corrosivo y peligroso.

Otro de los problemas originados por el uso de agentes ácidos de limpieza es el salpicado sobre los materiales. Los agentes ácidos atacan a los vidrios, al brillo de los mármoles, al granito pulido, al vidriado de las tejas y a las pinturas. Por ello, los elementos que se encuentren próximos al área de aplicación deben ser cubiertos por papeles y películas plásticas adhesivas y resistentes a la acción del ácido que se esté utilizando. Los ácidos tienen efectos duraderos, con un nivel de agresividad que puede comprobarse aún mucho tiempo después de su aplicación.



*IMAGEN 199. Descomposición de las micas negras del granito, por limpiezas efectuadas con ácido clorhídrico.*

Este efecto puede volver amarillas a ciertas superficies de la roca que contengan impurezas de hierro, las cuales se ven atacados por el HCl y migran hacia la superficie rocosa. El ácido fluorhídrico se aplica mediante cepillo y sprays. La superficie de aplicación debe haber sido humedecida previamente. Sin dejar demasiado tiempo después de la aplicación del ácido, esta debe ser lavada rápidamente con abundante agua a presión. De no realizarse este tipo de lavado, la piedra puede reaccionar con el ácido formando eflorescencias blancas (coloides de silicatos) que son muy difíciles de eliminar.

Además del ácido fluorhídrico, se utilizan también como agentes ácidos para la limpieza química los fluoruros de amonio. En rocas calcáreas el carbonato cálcico se transforma en fluoruro de calcio, que es menos soluble que el carbonato pero de volumen mucho menor.

Esto provoca en la superficie de la roca, fracturas por donde pueden introducirse contaminantes y soluciones dañinas. Sobre la sílice y los silicatos el fluorhídrico convierte el silicio en tetrafluoruro de silicio, que es una sustancia gaseosa.



- AGENTES ALCALINOS O BÁSICOS

El agente básico más utilizado en la LIMPIEZA QUÍMICA ALCALINA es la sosa cáustica. La sosa cáustica se suele usar con aditivos destinados al control del poder de penetración y del nivel de actividad que este agente puede alcanzar.

La mezcla que se utiliza es con hexametáfosfato de sodio con fosfato de amonio, junto a un agente humidificante y etanolamina, a un pH de 9.



IMAGEN 200. Sosa Cáustica.

El metafosfato de sodio y el fosfato de amonio disuelven el yeso sin atacar el  $\text{CO}_3\text{Ca}$  (carbonato cálcico), componente de las piedras calizas y mármoles.

Este método se recomienda especialmente para la limpieza de suciedades de las piedras calizas y de eflorescencias en las piedras arcillosas, en las tejas y en los ladrillos. Además, en calizas, mármoles y morteros, es muy útil para eliminar las costras de yeso. Si las suciedades son muy persistentes, se hacen necesarias aplicaciones sucesivas.

Después de cada una de las fases es preciso un aclarado de las piedras tratadas con agua abundante. Esto se hace para eliminar residuos, ya que empeorarían aún más las eflorescencias y suciedades. La eliminación de residuos dejados por la pasta de limpieza se realiza con varios cepillados y lavados. En el aclarado, también se pueden utilizar compresas de pulpa de papel o de algodón hidrófilo, embebidas en agua destilada.

La aplicación de la sosa cáustica es similar a la aplicación de agentes ácidos. Antes de utilizar la sosa cáustica se debe humedecer la zona que va a ser tratada.

La humedad previa y posterior necesaria a la aplicación del agente básico, obliga a tomar precauciones acerca de las posibles fisuras que pudieran existir en las piedras.

Por lo tanto, se debe realizar una inspección previa para sellar las juntas y fisuras que pudieran existir y no facilitar el acceso de humedades al interior de los materiales pétreos.

Otro tipo de uso para los agentes básicos se focaliza en la eliminación de las manchas verdes de las superficies de las piedras. Las manchas verdes que se ven en forma de chorreado sobre las piedras, pueden provenir de rejjas, carpinterías, monumentos y elementos diversos de bronce o cobre colocados sobre ellas. Estas manchas se pueden tratar con hiposulfito de sodio diluido y apoyado con un cepillado fuerte. Las manchas de cobre se eliminan con soluciones acuosas de amoníaco. Las manchas de óxido de hierro que se presentan en las piedras calizas, en los mármoles y en las piedras areniscas calcáreas se pueden eliminar utilizando el hiposulfito.

Los agentes de limpieza alcalinos constituyen una opción de eliminación de suciedades y manchas controlable. Además, es un método barato, de simple aplicación y rápidos resultados. Pero este método no debe ser utilizado en los materiales pétreos que presenten alteraciones avanzadas.



IMAGEN 201. Manchas de óxido de hierro.

En los mármoles puede causar corrosión intergranular y descohesión de los granos de calcita. En las piedras calizas muy porosas, al producirse la separación de la compres de la superficie de la piedra, se pueden arrancar partes importantes de la misma.

- **DISOLVENTES ORGÁNICOS**

Se utilizan para eliminar manchas grasas, es decir, restos de aceites y otros lípidos de la superficie de las piedras. En general, la presencia de componentes grasos en la capa de suciedad de las piedras se debe a restos dejados por tratamientos anteriores.

Los restos pueden ser aceites o ceras. Los residuos grasos son muy sensibles a la oxidación. Esta es la razón por la que generan variaciones en el color original de la piedra.

Los químicos orgánicos más utilizados en este tipo de limpieza son el tricloroetano y los hidrocarburos alifáticos (aminas) o aromáticos (tolueno). La metodología de aplicación es la de apósitos o compresas. Se elige este método debido a que se busca retardar la evaporación del disolvente mientras se alarga el contacto del mismo con la suciedad. Para lograr el retardo de la evaporación con mayor eficacia, deben cubrirse los apósitos de pulpa de papel con una capa de polietileno. De modo análogo a la aplicación de apósitos embebidos en agua que se utiliza en la limpieza húmeda, se debe sustituir el agua por los disolventes orgánicos.

Otra forma de preparación de los apósitos en la utilización de un gel, que se soportan en carboximetil-celulosa o en bentonita. Como en el caso de las compresas húmedas, este método es simple y de bajo costo. Sin embargo, supone que haya que esperar resultados no inmediatos.

- BIOCIDAS.

Los biocidas se aplican sobre los materiales pétreos con la finalidad de eliminar o paliar los efectos de los diferentes agentes biológicos de alteración. Estos agentes pueden ser microorganismos o bacterias e incluso restos de algas y líquenes o plantas superiores.



*IMAGEN 202. Limpieza de granito mediante un biocida con posterior limpieza mecánica.*

La finalidad del tratamiento no debe ser tan solo la eliminación de los organismos de la piedra, sino que hay que aplicarle tratamiento para hacerla más resistente a nuevas colonizaciones. Por otro lado, estos biocidas no deben cambiar el aspecto exterior de las piedras sobre las que trabaje. No deben tener efectos dañinos para los operadores encargados de aplicarlos pero tampoco para el medio ambiente.

Por último, se debe tener precaución de que no se laven los productos aplicados con agua de lluvia o minimizados sus efectos por los rayos solares ultravioletas.

Los productos biocidas que más se han investigado son la ESTREPTOMICINA y la KANAMICINA. Estos dos productos han tenido bastante éxito en tratamientos antibacterianos.

La aplicación de biocidas para la eliminación de plantas superiores es un buen método de limpieza, antes que arrancarlas en vivo. Las plantas



superiores vivas que son extraídas de las piedras producen daños irreparables. Si se inyecta en estos organismos superiores dosis de biocidas apropiadas para generar su secado, se evitará originar daños y alteraciones a los materiales pétreos que se quiere limpiar.

### RAYOS LÁSER Y ULTRASONIDOS

Tanto el método de limpieza por APLICACIÓN DE ULTRASONIDOS como el de APLICACIÓN DE LÁSER, tienen en común su bajo nivel de agresión para con los materiales pétreos que tratan. Aquí se encuentra la razón por la que estos sistemas de limpieza son cada vez más utilizados.

La limpieza realizada mediante ultrasonidos no causa ningún tipo de daño a la piedra subyacente. El método de limpieza mediante la aplicación de ultrasonidos se utiliza para la eliminación de costras.

Para llevar a cabo la aplicación de ondas ultrasónicas, se requieren de aparatos que puedan transmitir las vibraciones a la costra negra. La transmisión de ondas se realiza a través de una película de agua. El agua transmite vibraciones y logra que la costra se vaya despegando de la superficie de la piedra. Al finalizar el trabajo se deben enjuagar los restos de suciedad.



IMAGEN 203. Limpieza mediante ultrasonidos, agua - aire.

El método de limpieza por aplicación de ultrasonidos es lento, por lo que se le utiliza en objetos de pequeñas dimensiones. Pero tiene la ventaja de ser muy preciso y útil.

El método de limpieza de piedras con rayos láser tiene la característica de ser un método de eliminación de suciedades que no entra en contacto con la piedra. Este hecho hace que el daño sobre la capa superficial de los materiales pétreos sea casi nulo.

Para realizar el procedimiento se deben rociar las paredes ennegrecidas o sucias de la superficie de las piedras con un haz de fotones por medio de rayo láser.

Este haz de fotones puede eliminar depósitos y costras sin eliminar la capa superficial de la piedra. Incluso deja la pátina superficial intacta. Como este método no introduce agua ni componentes químicos en el seno de la piedra, es uno de los métodos de limpieza más prácticos e inofensivos. Además, como no ejerce impacto ni abrasión, tiene la ventaja de no introducir ruidos medioambientales o polvos en la atmósfera.



*IMAGEN 204.Limpieza mediante rayo láser.*

El láser permite variar la intensidad de la luz que se emite. Esta variación permite limpiar capas de suciedades de distintos espesores. Ante costras espesas se deben emplear energías mayores a diez megavatios por centímetro cuadrado. Esto produce la ionización del material depositado. Cuando las pátinas o costras son finas, se las remueve con intensidades menores que logran la vaporización de los elementos depositados.

La utilización de rayos láser en la limpieza de los materiales pétreos requiere de la realización de pruebas o de ensayos de laboratorio. El objetivo de los ensayos es el de determinar la longitud de onda del haz de fotones que se debe proyectar. Requiere, además, que el operario a cargo de la protección se encuentre muy protegido.

La ventaja más importante de la aplicación de rayos láser en la limpieza de las piedras, al no presentar riesgos de grandes agresiones, es que permite limpiar piedras que se encuentran descohesionadas, sin necesidad de realizar preconsolidaciones. Además, posee fácil acceso a las partes más recónditas de las piedras labradas, lo que le convierte en un instrumento ideal de limpieza de esculturas y tallas complejas realizadas en piedra.



*IMAGEN 205. Columna de granito, limpiada mediante rayo láser.*





IMAGEN 206.Limpieza de la piedra del Claustro de la Catedral de Oviedo. La capa de suciedad (pátina oscura) y el yeso de neoformación asociado a ella, así como las partículas sólidas de naturaleza diversa fueron eliminadas mediante una limpieza con láser.





## 4.2. CONSOLIDACIÓN

El proceso de consolidación de los materiales pétreos tiene la finalidad de devolver o aumentar la cohesión de los componentes de las piedras que la han perdido o visto reducida.

La consolidación superficial de las piedras engloba a los procedimientos que están destinados a restablecer la firmeza de los elementos pétreos que debido a los procesos de alteración y degradación se han convertido en una masa de partículas pulverulentas con poca aglutinación.

Los principales métodos de consolidación se basan fundamentalmente en tres procesos:

- Reemplazamiento de aquellos constituyentes de la piedra que son propensos al ataque atmosférico, y precipitación de materiales químicamente resistentes en sus poros, para consolidar los granos sueltos. Estos serían los tratamientos con soluciones de compuestos inorgánicos, como el hidróxido de bario, silicatos alcalinos, etc.
- Precipitación de sílice, procedente de ésteres de silicona. en los poros de la piedra.
- Impregnación de la piedra con polímeros orgánicos con objeto de cementar los granos que han quedado sueltos a causa de la alteración, e impermeabilizar y proteger la piedra de posteriores ataques.

La consolidación hace frente, principalmente, a tres clases de problemas. Los problemas son la ARENIZACIÓN, EXFOLIACIÓN de los materiales pétreos, la FISURACIÓN y los PROBLEMAS ESTRUCTURALES.



Las zonas de las construcciones pétreas que se encuentran más expuestas –como los pináculos, la crestería, los elementos ornamentales exentos– suelen presentar movimientos de bloques.

#### **4.2.1. CARACTERÍSTICAS DE LOS CONSOLIDANTES**

Las características exigidas a los consolidantes se pueden dividir en dos categorías. Las características primarias son las que el consolidante debe cumplir independientemente de su aplicación específica. Las características secundarias son aquéllas a tomar en consideración en cada tratamiento particular. A continuación se revisan las principales características primarias.

##### VALOR CONSOLIDANTE

La función más importante de un consolidante es restablecer la cohesión de los granos de la piedra deteriorada. Los métodos que se usan para obtener una medida cualitativa del valor de la consolidación incluyen medidas de resistencia a la tracción y a compresión, de la dureza superficial y de la resistencia a la abrasión. Los dos primeros ensayos serían los más representativos, pero requieren muestras en número y dimensiones tales que no pueden ser extraídas del monumento.

##### ALTERABILIDAD DE LA PIEDRA CONSOLIDADA

La alterabilidad de la piedra consolidada depende de diversos factores: alterabilidad de los dos componentes del sistema producto-piedra, características del medio ambiente, compatibilidad del consolidante con la piedra, etc. La alterabilidad de la piedra tratada debe ser inferior a la de la piedra sin alterar, ya que en caso contrario sería preferible su sustitución.

Mediante ensayos de alteración acelerada se ha estudiado el comportamiento de diversos polímeros frente a la radiación ultravioleta y al anhídrido sulfuroso. La resistencia a estos dos agentes es mucho mayor en el caso de los órganos silícicos, y



disminuye en los acrílicos, epoxis y poliésteres; el comportamiento en el sistema polímero-piedra puede seguir, sin embargo, una conducta diferente.

### PROFUNDIDAD DE PENETRACIÓN

Un consolidante ha de ser capaz de penetrar en profundidad y restablecer la cohesión entre la zona externa alterada y el sustrato interno sin alterar.

A menos que la impregnación de la piedra sea total, se forma una interfase zona tratada-zona no tratada que marca un cambio de propiedades, tales como porosidad o acceso al vapor de agua y al agua líquida. Si la zona tratada queda reducida a una fina capa superficial se producen dos fenómenos: una acumulación del consolidante que disminuye la porosidad y dificulta el movimiento del agua, y una acumulación de sales en la interfase como consecuencia de la evaporación del agua, cuyos sucesivos ciclos de cristalización causan el desprendimiento de la parte consolidada en forma de placas.

La profundidad de penetración es inversamente proporcional a la viscosidad del producto aplicado y al ángulo de contacto, y directamente proporcional a la tensión superficial.

Los tratamientos con productos inorgánicos son los que alcanzan menor penetración.

### MODIFICACIÓN DE LA POROSIDAD

La alterabilidad de una piedra está relacionada en gran medida con su contenido en agua y las posibilidades de movimiento de ésta en su interior. Por ejemplo, la resistencia a la formación de hielo o la cristalización de sales es menor cuando aumenta la proporción de poros finos. Si un tratamiento provoca un aumento de la proporción de poros menores de un radio determinado la alterabilidad de la piedra se verá más incrementada que si los poros más afectados son los de mayor tamaño.

### CAPACIDAD DE TRANSFERENCIA DE HUMEDAD

El agua penetra en la piedra en estado líquido o gaseoso, a través de las superficies expuestas a la atmósfera o próximas al suelo.

Existen productos consolidantes con propiedades hidrófugas que impiden el movimiento del agua líquida y afectan, en mayor o menor medida, la permeabilidad al vapor. Su aplicación en zonas bajas, en las que el agua sube por capilaridad desde el terreno, provoca la formación de una barrera en la que se acumularían las sales. Los consolidantes deben ser hidrofílico<sup>18</sup> a fin de permitir el paso de la humedad a través de la piedra, de forma que la permeabilidad al vapor no disminuya considerablemente. Por esto la tendencia actual es utilizar productos simplemente consolidantes, y sólo en caso necesario aplicar posteriormente el hidrófugo.

### COMPATIBILIDAD CON LA PIEDRA

El tratamiento con un consolidante no debe ser causa de alteraciones posteriores. Esto implica la compatibilidad del producto y la piedra, tanto física como química.

El aspecto químico está relacionado con la posible aparición de productos que puedan reaccionar con los componentes de la piedra o dañar su estructura, como sales solubles o impuesto gaseosos. También es deseable que el producto depositado en el interior de los poros no forme productos cuya cristalización pueda afectar a la microestructura y provocar fisuras.

Desde el punto de vista físico, las propiedades de la piedra consolidada deben ser similares a las de la piedra sin alterar, a fin de que no se creen tensiones entre la capa tratada y el sustrato interno. Los coeficientes de dilatación térmica de los polímeros orgánicos suelen ser del orden de 10 veces mayores que los de los componentes más frecuentes de los materiales pétreos. Una variación de temperatura genera tensiones que finalizan en una alteración.

Las dilataciones debidas a la humedad son aceptables para todos los productos, con excepción de los acrílicos, que dan origen a dilataciones muy superiores a las del material sin tratar.

---

<sup>18</sup> *Relativo a la propiedad de atraer moléculas de agua que poseen los radicales polares o iones.*



### EFFECTO EN EL ASPECTO DE LA PIEDRA

La piedra no debe sufrir cambios de color o de brillo a causa de un tratamiento de consolidación.

Los tratamientos con productos inorgánicos provocan muchas veces la aparición en la superficie de manchas de color blanco, que pueden ser debidas a los productos de la reacción entre el consolidante y la piedra, o bien a eflorescencias de sales solubles.

Los productos orgánicos, si no se aplican correctamente, modifican en la mayoría de los casos la reflectancia de la piedra, dándole un aspecto brillante. Para evitarlo debe eliminarse, antes del curado, el exceso de producto que pueda quedar en la superficie.

En el caso de los productos orgánicos, es muy importante la acción de los agentes ambientales,

especialmente de la radiación UV. Después de varios años de exposición pueden aparecer cambios de color, de brillo, formación de escamas, etc. Por el contrario, algunos tratamientos modifican la apariencia de la piedra recién aplicados, en especial el brillo, desapareciendo este efecto después de cierto tiempo de exposición al exterior.

### PROPIEDADES SECUNDARIAS

Estas propiedades son las que están especialmente relacionadas con cada aplicación en particular.

Por lo que respecta a las características del producto, factores a tener en cuenta a la hora de su elección son su facilidad y velocidad de curado, su viscosidad, inflamabilidad, toxicidad, presión de vapor, miscibilidad con el agua, sensibilidad al contenido de agua de la piedra y a su estado de limpieza, etc.

Con respecto a la aplicación del producto, es necesario tener en cuenta las características del sustrato, como son la presencia de fisuras, su estado de alteración,



la necesidad de una mayor o menor resistencia a la abrasión, la presencia de microorganismos, etc.

En cuanto a las características del ambiente, hay que considerar la posibilidad de aparición de hielo, la presencia y concentración de agentes agresivos (gases contaminantes o los aerosoles derivados de procesos de smog fotoquímico), la exposición a la radiación o la presencia de sales.

Aparte de todos estos factores, la técnica de aplicación es decisiva a la hora de obtener resultados satisfactorios. La aplicación del producto implica el acondicionamiento previo de la piedra, la impregnación y el curado.

La piedra debe encontrarse, en lo posible, limpia y seca para alcanzar un buen resultado, ya que la suciedad dificulta la penetración del producto.

La fase de impregnación ha de tener como objeto lograr que el producto penetre tanto como sea posible, ya sea aumentando las fuerzas que actúan sobre la penetración (por ejemplo, sometiendo el objeto a vacío), bien aumentando el tiempo de contacto con la solución mediante sucesivas aplicaciones o con algún dispositivo que mantenga continuamente mojada la piedra.

Durante el curado, fase en la que tiene lugar la evaporación del solvente y, en su caso, la polimerización, es preciso evitar la migración del consolidante hacia la superficie; para ello, la velocidad de evaporación y la de polimerización deben guardar una relación apropiada.

## 4.2.2. CLASES DE CONSOLIDANTES

Los consolidantes se pueden dividir en tres grandes grupos:

- COMPUESTOS INORGÁNICOS
- COMPUESTOS ORGÁNICOS
- COMPUESTOS MIXTOS O SILICO-ORGÁNICOS.

### CONSOLIDANTES INORGÁNICOS

Los productos de consolidación inorgánicos poseen una naturaleza similar a la de los componentes minerales de los materiales pétreos. Estos productos son, en general, durables pero no son muy penetrantes.

Reaccionan con mucha velocidad, y eso reduce aún más su capacidad de penetración en el seno de la piedra tratada.

Su capacidad de relleno de espacios vacíos se limita a tamaños inferiores a un rango de 50-100 micras. Son más frágiles que los consolidantes orgánicos y menos elásticos que éstos. Sin embargo, duran más que los productos orgánicos. Los consolidantes inorgánicos presentan una estructura cristalina afín con la de las rocas.

Por último, los consolidantes inorgánicos no logran una mejora en las propiedades mecánicas de las rocas bajo tratamiento tan elevada como lo hacen los consolidantes orgánicos.

Una vez aplicado el consolidante inorgánico, precipita un nuevo producto, insoluble en agua débilmente adherido a los componentes minerales de la piedra. La precipitación se produce como resultado de la reacción entre el consolidante aplicado y los componentes de la piedra, con el agua con la que se pone en contacto o con el dióxido de carbono del aire.

El compuesto resultante, debido a su afinidad con el material que compone la roca, se adhiere a las paredes de los capilares.



Los productos inorgánicos tradicionalmente utilizados para la consolidación son la cal y los alumbres.

- **HIDRÓXIDO CÁLCICO.** Se evapora dejando un residuo de hidróxido, que se carbonata posteriormente cuando entra en contacto con el dióxido de carbono del medio ambiente. En general, se realizan varios tratamientos para obtener una consolidación adecuada.
- **HIDRÓXIDO DE BARIO.** Produce un carbonato más resistente e insoluble. El hidróxido de bario actúa de la misma manera que el de calcio. Sin embargo, tiene el inconveniente de producir blanqueamientos cuando las aplicaciones no son correctas y requiere un sustrato completamente libre de sales. El hidróxido de bario carbonata más fácilmente cuando la disolución concentrada de hidróxido de bario al 20 % se une con un 10 % de urea. La urea por descomposición genera anhídrido carbónico y urea.
- **BICARBONATO DE CALCIO.** Actúa por descarbonatación y deshidratación, precipitando carbonato cálcico. Estos tratamientos son más adecuados con materiales altamente porosos, ya que esto permite la carbonatación completa del ligante. Los materiales pétreos más adecuados para ser tratados con estos consolidantes son los calcáreos.

La base de composición de las piedras calcáreas son carbonatos de calcio (calcita) o carbonatos cálcicosmagnésicos (dolomita). Así, el tratamiento no introduciría ningún elemento extraño a su composición original.

Tanto el hidróxido de calcio, como el hidróxido de bario y el bicarbonato de calcio son capaces de consolidar materiales que se encuentran muy descohesionados.

- **ALUMINATO DE POTASIO.** La consolidación se produce por reacción y precipitación de la alúmina en el espacio poroso. La ligazón que presenta es de



tipo electrostático. El inconveniente que presenta el aluminato de potasio es la generación de hidróxido potásico. Esta base se puede transformar en sulfato o carbonato. Estas dos sustancias son muy solubles al agua y tienen gran poder de degradación de las rocas.

- **SILICATOS.** Son consolidantes orgánicos que tienen un uso bastante extendido. Liberan gel de sílice como ligante de los granos rocosos. Esta es la razón por la que los silicatos son muy adecuados para consolidar materiales silíceos o para proporcionar una base de sílice a rocas que recibirán un tratamiento posterior con siliconas o silanos (si la roca que carece de silicatos).



*IMAGEN 207. En la restauración de la cabeza de un relieve romano se ha efectuado una preconsolidación de la superficie marmórea con un consolidante a base de silicato de etilo aplicado en fases sucesivas para obtener una mayor penetración.*

El sílice es un producto resistente e inerte, pero irreversible. De este modo, cualquier error, tratamiento excesivo o inadecuado, produce blanqueamientos imposibles de borrar.

Un producto cada vez más utilizado en la consolidación inorgánica es el ÉSTER SILÍCICO O SILICATO DE ETILO. Estos ésteres reaccionan con el agua cuando se encuentran con un catalizador ácido, como el ácido clorhídrico.



El resultado de la reacción es la precipitación de gel sílice y alcohol, en lugar de las bases fuertes de los silicatos alcalinos. Después del desecado, el ácido silícico libera sílice libre que cohesiona y adhiere los granos de la piedra.

El alcohol ayuda en la eliminación de la humedad y para evaporarse posteriormente.

La reacción descrita no es rápida y se debe aguardar un tiempo prudencial para poder garantizar su resultado. Al ser los ésteres silícicos volátiles, se deben evitar evaporaciones prematuras, antes de que la reacción se haya completado. Estos productos presentan una baja tensión superficial, lo que se constituye como un factor positivo para que penetre.

Sin embargo, los materiales consolidados deben ser hidrofugados después del tratamiento, como consecuencia de la característica hidrofílica de la sílice. El inconveniente que presenta es que es irreversible, y que su velocidad de reacción no se puede predecir.

### CONSOLIDANTES ORGÁNICOS

Los consolidantes orgánicos poseen una naturaleza diferente a la de la piedra. Actúan formando una película adhesiva hidrofugante que cubre la superficie. Además, reviste las paredes de los capilares o conductos porosos.

Al ser productos hidrofóbicos, no se los puede utilizar para la preconsolidación en la limpieza húmeda.

Los consolidantes orgánicos, tienen propiedades físicas y químicas muy diferentes a las de las piedras, por ejemplo, su dilatación térmica es muy distinta. El efecto de los consolidantes orgánicos no es muy duradero y pueden cambiar su color cuanto están expuestos a las radiaciones solares ultravioletas.



Por otro lado, se caracterizan por su elasticidad y por ser buenos adhesivos. Las soluciones que se utilizan para inyectar consolidantes orgánicos no tienen demasiada capacidad de absorción, por lo que una vez que se polimerizan son filmógenos. Por último, los consolidantes orgánicos no colman los poros, sino que forman una capa de material adhesivo que cubre las paredes, lo que permite la transferencia de humedad.

Se necesita de la dilución previa de los consolidantes orgánicos para optimizar la penetración y asegurar una baja viscosidad, y lograr que no se forme una película en la superficie. El producto disuelto no debe tener mucho contacto con el aire, ya que la evaporación rápida del disolvente provocaría un aumento en la concentración y viscosidad del producto, lo que disminuiría su capacidad de penetración.

Los consolidantes más utilizados son:

- **RESINAS TERMOPLÁSTICAS.** Especialmente las resinas acrílicas. Estas resinas constituyen derivados del ácido acrílico que se obtienen generalmente mediante la polimerización del metacrilato de metilo.  
Esto provoca la obstrucción de la porosidad y logran un efecto de impermeabilización que no permite la transpiración. Para lograr una penetración más profunda, se necesita una repetición de la aplicación del producto, muy diluido.
- **ACETATO DE POLIVINILO.** Este producto se obtiene por polimerización del acetato de vinilo. El producto debe ser inyectado en emulsión bajo la capa desprendida. Esto se debe a que el producto no deposita una película homogénea sobre los poros de la piedra, sino que deposita grumos que ocluyen la porosidad.
- **RESINA ACRÍLICA.** Son emulsiones que se utilizan como fijador de capas pictóricas, son reversibles, al ser solubles en disolventes orgánicos. Además, impermeabilizan las superficies de los poros, ya que les suministran ciertas propiedades hidrófugas.

### CONSOLIDANTES MIXTOS (SILICO-ORGÁNICOS)

Son utilizados tanto para la consolidación de los materiales pétreos como para su protección, ya que tienen efecto de hidrofugado.

En general, los productos silico-orgánicos son fáciles de aplicar porque tienen un solo componente. Además, no colman los poros o fisuras de la piedra y no impiden la difusión del vapor de agua. No suelen modificar el color y el brillo de la piedra y presentan una buena penetración. Asimismo, los productos silico-orgánicos no generan productos secundarios.

Este tipo de productos consolidantes llevan silicio en su composición. El silicio, al igual que el carbono, se puede unir a sí mismo posibilitando la formación de compuestos inorgánicos que son análogos a los orgánicos.

Los silanos con enlaces de tipo éster se utilizan con la doble finalidad de consolidación y de hidrofugación. Uno de estos silanos es el metil-fenil-etoxi-silano. Este tipo de compuesto penetra bien en el material y constituye un repelente orgánico. Sin embargo, es irritante. La reacción que transforma el silano en un polisiloxano en el sistema poroso, genera filamentos que consolidan los granos, uniéndolos.

Por otro lado, además de consolidar, hidrofugan. Las siliconas se utilizan sólo para hidrofugar, ya que están polimerizadas y la evaporación del disolvente deja una película fina del producto, que recubre el sistema poroso de la roca.

Si es necesario consolidar se aplica un tratamiento previo, que puede ser a base de silicato de etilo, que proporciona a la piedra la base silícea que necesita para el agarre químico de la silicona, en el caso en que la roca sea de tipo carbonatado.

En este tipo de rocas, la unión de la película de silicona es mecánica solamente y las siliconas suelen ser inestables en el medio alcalino que caracteriza a estas piedras (que se agudiza si existen morteros de cal mal carbonatada).



Las siliconas en cadena lineal no son solubles en agua pero sí en disolventes orgánicos. Se suelen comercializar como emulsiones para inyectarse y formar barreras contra la capilaridad ascendente.

Un inconveniente que presentan las siliconas es que son inestables frente a la luz y al oxígeno. De este modo, se hace obligatorio el mantenimiento periódico.

La capa hidrófoba que dejan es, además, débil frente a las agresiones mecánicas. Otro problema que generan las siliconas es la producción de sosa cáustica.

Si se mezclan las siliconas con las resinas acrílicas, se obtienen compuestos que agregan a las propiedades hidrófobas de las primeras la resistencia de las segundas.

#### **4.2.3. MÉTODOS DE APLICACIÓN**

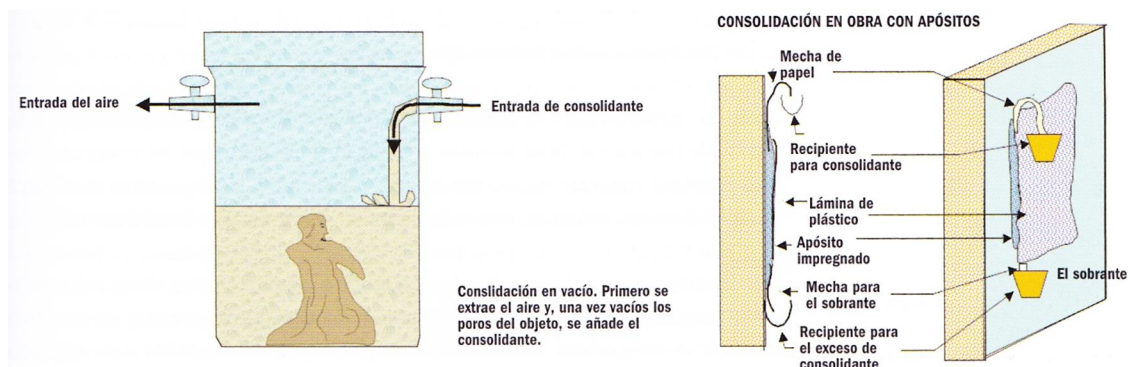
La elección de un producto adecuado para efectuar la consolidación es un factor fundamental, un buen producto aplicado incorrectamente puede producir muy malos resultados.

Al tratar cada uno de ellos se efectuarán las indicaciones específicas, pero de una manera general hay que señalar que cada reacción implica un tiempo y unas condiciones determinadas que han de respetarse; por ejemplo, los ésteres silíceos requieren al menos tres semanas para que la reacción se complete; variaciones ambientales durante la reacción pueden llevar a eflorescencias blancas de gel de sílice muy difíciles de eliminar. Una concentración excesiva de acrílico en una piedra poco porosa puede producir cambios de tono, o lo que es peor, capas impermeables y brillantes sobre el sustrato que impedirán la transpiración mientras que una concentración correcta, aplicada adecuadamente puede producir los mejores resultados.

En general, se puede señalar que durante el tiempo de reacción del producto se debe evitar la insolación directa de la zona tratada y los cambios excesivos de temperatura y humedad. El área debe encontrarse protegida contra eventuales precipitaciones.

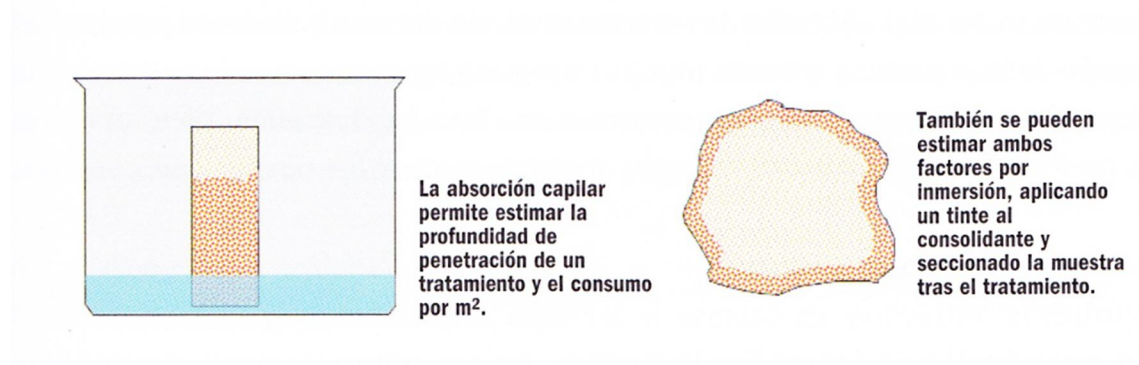


En definitiva, se trata de que el tratamiento penetre lo más profundamente posible. La forma más simple de aplicación es a brocha o spray empapando hasta saturación. Es una forma económica de ejecutar una aplicación pero se pierde el exceso de producto y, además, el aire alojado en los poros dificulta la penetración. Para evitar ambos efectos, lo mejor sería efectuar una impregnación en vacío por inmersión. Esto es difícil de realizar en obra, por lo que se suele llevar a cabo cuando una pieza puede ser desmontada y trasladada a un taller. Sin embargo, se han realizado intentos de aislar el área a tratar con objeto de, si no conseguir un vacío completo, al menos crear una depresión que facilite la introducción del tratamiento. Para ello se utilizan láminas de polietileno, adheridas con la máxima estanquidad posible provistas de dos boquillas, una para la salida de aire, conectada a una bomba de aspiración y otra al recipiente con el producto. El éxito mayor o menor de la operación dependerá de la rugosidad de la superficie, de la porosidad del material y de la presencia de microfisuras. En algunos casos, entre la lámina de polietileno y el sustrato se coloca una lámina de material absorbente para facilitar la operación.



En otras ocasiones los tratamientos se pueden aplicar en cortina, dejando resbalar el producto por la superficie a partir de unas brochas tratando de recoger el exceso. Esta metodología tiene la ventaja de que el producto permanece en contacto un tiempo prolongado con la superficie, permitiendo la absorción durante un tiempo mayor y una mejor saturación de la misma. El inconveniente es la evaporación durante ese tiempo y la precipitación de producto en superficie.

Para evitar este último inconveniente se puede acudir a aplicar un apósito empapado de producto, cubierto de una lámina de polietileno similar al sistema descrito para trabajar en vacío. La alimentación se efectúa por la parte superior mediante una mecha. El exceso se recoge en la inferior mediante un recipiente.



El producto penetra en el sistema poroso por capilaridad.

### 4.3. HIDROFUGACIÓN

Aunque ya se ha tratado un el tema en el apartado de consolidación a continuación estudiaremos un poco más en profundidad la hidrofugación en materiales pétreos.

La humedad es un factor de esencial importancia en el proceso de deterioro de los materiales de construcción. Los hidrófugos son productos incoloros utilizados para reducir la absorción de agua a través de la superficie de los materiales, sin afectar sensiblemente a su aspecto.

Este efecto puede conseguirse por medio de:

- Taponamiento de los poros y capilares; en este grupo podrían incluirse los llamados tratamientos de "impregnación total", cuyo objetivo es rellenar completamente todos los huecos del material. De esta forma, la piedra se conserva impidiendo el desarrollo de mecanismos de alteración. Este procedimiento ha sido utilizado con productos acrílicos y sólo es aplicable a objetos pequeños, en los que, sometiéndolos previamente a vacío puede asegurarse el llenado total de los poros. Se pueden emplear también los productos a base de silicatos, fluosilicatos y ceras. Un fallo en una pequeña zona puede permitir que comience la alteración.
- Creación de una película más o menos adherida a la superficie del material, con productos filmógenos o semifilmógenos. Sería el equivalente a trasladar la piedra a un museo con atmósfera condicionada. La película aísla a la piedra de los agentes agresivos presentes en el medio ambiente. Por tratarse de un tratamiento superficial sólo en casos contados se podrá lograr el aislamiento de todas las caras del material, de forma que los agentes agresivos continuarían accediendo a su interior con el problema adicional de que no podrán salir. Como en el caso anterior, sólo es aplicable a objetos pequeños, y también un fallo en la película puede tener efectos contraproducentes.



- Disminución de la energía superficial del soporte; el agua no moja al sustrato al aumentar su ángulo de contacto. Se permite la respiración del material y el intercambio de vapor de agua con el ambiente. Si el agua líquida accede al interior del material por una superficie no tratada puede volver al exterior en forma de vapor. Es el caso de siliconas y organometálicos.

El tratamiento de restauración puede efectuarse aplicando un producto que tenga efecto hidrófugo y consolidante a la vez, usando primero un consolidante y a continuación un hidrófugo, o simplemente con un hidrófugo si la piedra se encuentra en buen estado. Después de la limpieza siempre es conveniente aplicar un tratamiento de hidrofugación, ya que la superficie queda rugosa y con mayor porosidad lo que facilita el acceso del agua y el ataque por los contaminantes atmosféricos.

El tratamiento de una superficie de piedra con un producto hidrófugo es fundamentalmente igual al tratamiento con pintura de una superficie de acero expuesta al ambiente. En este último caso, es bien sabido que la superficie antes del tratamiento debe estar perfectamente limpia; también se tiene en cuenta el hecho de que la vida útil de la pintura es limitada, tomándose medidas para repetir el tratamiento periódicamente.

Sin embargo, estas sencillas precauciones no están extendidas a la conservación de monumentos, ya que con frecuencia se han aplicado tratamientos de hidrofugación a superficies alteradas y sucias, esperándose una duración ilimitada de los mismos, por lo que no se han previsto inspecciones periódicas y repeticiones de estos tratamientos.

### 4.3.1. CARACTERÍSTICAS DE LOS HIDRÓFUGOS

Un buen hidrófugo debe tener las siguientes propiedades primarias:

- Impermeabilidad al agua líquida.
- Mínima influencia sobre las propiedades ópticas del material pétreo. No modificar su apariencia.
- Estabilidad frente a los agentes químicos, especialmente a los contaminantes ácidos atmosféricos, y estabilidad frente a la radiación UV.
- Permeabilidad al agua vapor, para que, si el agua consigue penetrar en la piedra, pueda salir en forma de vapor.
- Reversibilidad o, al menos, fácil eliminación cuando el protector haya perdido su eficacia, o posibilidad de aplicar un nuevo tratamiento encima.
- Si el tratamiento aplicado consiste en un producto que reacciona en la piedra, no deben formarse subproductos perjudiciales.
- Buena adhesión al material de construcción, para que no pueda ser arrastrado por el agua de lluvia.
- Buenas propiedades de impregnación: suficiente profundidad de penetración.
- Fácilmente aplicable.

Las propiedades secundarias serían las siguientes:

- Resistencia a los álcalis.
- Bajo peso molecular, si han de ser aplicados a materiales poco porosos.
- Propiedades biocidas.
- Posibilidad de aplicación a sustratos húmedos.
- No producir manchas en la superficie tratada.
- Compatibilidad con consolidantes, para poder aplicar los dos tratamientos en caso necesario.
- Repeler la suciedad. Muchos tratamientos hidrófugos ofrecen como ventaja adicional su menor tendencia a retener partículas de polvo y una mayor facilidad para eliminar las que se hayan depositado.



- Capacidad para eliminar las eflorescencias.
- Poseer cualidades de aislamiento térmico.

### 4.3.2. CLASES DE HIDRÓFUGOS

La mayoría de los productos hidrófugos actualmente utilizados son compuestos sintéticos en muchos casos de los mismos tipos que los usados como consolidantes, y que ya se han descrito en el apartado correspondiente. Por lo tanto, aquí solo se va a tratar de las características específicas de su uso como hidrófugos.

#### COMPUESTOS DE SILICIO

- SILICONAS. Actualmente se utilizan más los siliconatos potásicos, que poseen algunas ventajas frente a las sales sódicas. Son más resistentes a las heladas, y en su reacción forman carbonato potásico que por su comportamiento al cristalizar, es menos perjudicial que el carbonato sódico. De esta forma puede evitarse la coloración blanquecina cuando se impregnan materiales oscuros.

Junto con el metilsiliconato potásico, que se usa solamente para impregnación de materiales alcalinos, se emplean también los siliconatos con radicales alquílicos de mayor peso molecular, por ejemplo, el propilsiliconato. Estos se distinguen por una resistencia a los álcalis muy elevada, pudiendo por tanto aplicarse a materiales de construcción alcalinos, como hormigón y fibrocemento.

- ORGANOSILICICOS .Entre los compuestos hidrófugos, los organosilícicos son los que ofrecen las mayores ventajas. Forman películas muy finas caracterizadas por una gran hidrofobicidad, duración y resistencia a los agentes atmosféricos, a la luz, a los productos químicos y a los microorganismos. Son invisibles, y resisten bien a las altas y bajas temperaturas. Se alteran sólo por la acción de agentes muy agresivos, como ácido fluorhídrico o soluciones de hidróxido potásico en alcohol. Su baja viscosidad les permite penetrar profundamente,

formando una película hidrófuga en los poros del material que rodea los granos de la piedra.

Son los productos llamados comercialmente siliconas pertenecen a tres grupos:

- Monómeros (silanos)
- Oligómeros (siloxanos)
- Polímeros o resinas de silicona

### CERAS

Son sustancias orgánicas, sólidas en condiciones normales, que funden al calentarse, dando líquidos de baja viscosidad; son insolubles en agua y poseen altas cualidades hidrófugas.

Entre los materiales usados en el pasado figuran esencialmente la cera natural, los aceites vegetales y más raramente, grasas animales y algunas ceras minerales, sobre todo la parafina y la cera microcristalina.

La cera microcristalina formada por hidrocarburos alifáticos y cicloalifáticos de elevado peso molecular, 35 a 37 átomos de carbono por molécula, tiene la ventaja, respecto de la cera natural, de una mayor constancia de composición, y por tanto de características. Tienen buena estabilidad química y a la luz solar, y buena hidrorrepelencia. Tienen mayor punto de fusión que las naturales, por lo que son menos pegajosas y retienen menos suciedad a temperatura ambiente, pero se eliminan con más dificultad.

La cera microcristalina se aplica con brocha a partir de una solución en un solvente no polar, normalmente hidrocarburos aromáticos o clorados, y después del secado se funde pasando rápidamente un soplete. Esto representa una gran complicación, y hace su empleo poco frecuente y reservado a objetos pequeños.



En los últimos 10 años todavía se encuentran algunos casos de tratamiento de esculturas al exterior con ceras microcristalinas solas o más frecuentemente mezcladas con resinas acrílicas y silicónicas.

La parafina es una mezcla de hidrocarburos saturados, con 10 a 34 átomos de carbono por molécula. Es soluble en hidrocarburos alifáticos y aromáticos, e insoluble en alcoholes; resiste a la acción de ácidos y álcalis. Su bajo punto de fusión hace que se ablande con la radiación solar y se pegue el polvo. Se aplica disuelta en xileno y en emulsión acuosa de bajo porcentaje de parafina.

### ORGANOMETÁLICOS

Las sales de ácidos grasos superiores y de iones metálicos, fundamentalmente sodio, potasio, magnesio, cinc y aluminio, se han introducido en el tratamiento de edificios modernos, pero sus aplicaciones a monumentos son escasas. El más usado es el estearato de aluminio, aunque los ensayos realizados para evaluar su eficacia han dado resultados contradictorios. Pueden aplicarse en soluciones acuosas o en solventes orgánicos, white spirit o xileno.

En este último caso se obtiene una hidrofugación más marcada que en solución acuosa. Su aplicación a la piedra no modifica su porosidad ni su coeficiente de dilatación térmica, pero tienen malas propiedades mecánicas y una baja temperatura de fusión.

### POLÍMEROS ORGÁNICOS

Las resinas acrílicas se están usando a menudo como hidrófugos, sobre todo por su alta resistencia a la radiación UV. La hidrorrepelencia es menos elevada que la de los productos silicónicos, y parece disminuir notablemente tras un contacto prolongado con el agua. Por otra parte, su aplicación a piedras muy porosas provoca a menudo una notable variación en el color. En piedras poco porosas una mezcla de ésteres del ácido metacrílico ha dado buenos resultados.



Para materiales de baja porosidad, como mármol, expuestos al ambiente, resulta satisfactorio el uso de mezclas acril-silicónicas en las cuales las buenas propiedades de la resina acrílica son potenciadas por la alta hidrorrepelancia del polímero silicónico.

Otro polímero empleado, con buenos resultados después de 20 años de aplicación, es el acetato de polivinilo.

Las resinas epoxi no parecen apropiadas para esta aplicación, por su tendencia a decolorarse y oxidarse cuando se exponen a la luz. Los poliésteres muestran también una velocidad de alteración superficial relativamente alta cuando se exponen directamente al ambiente. El uso de resinas termoestables en películas superficiales no parece aconsejable, a causa de su limitada solubilidad en el solvente de aplicación, lo que puede hacer difícil su eliminación en caso de necesidad.

#### 4.4. SUSTITUCIÓN Y REPOSICIÓN

La sustitución consiste en el cambio de una piedra de la construcción por otra. La piedra sustituta debe tener un aspecto y unas características petrofísicas congruentes con la piedra que se quita y con la construcción y el ambiente donde va a ser ubicada.

Tanto para la sustitución como para la reposición de piedras es necesario localizar el material que sea el más adecuado, es decir, se debe localizar la cantera de origen o una piedra de naturaleza similar.

La colocación de la piedra de reposición o de la piedra sustituta es uno de los aspectos más importantes de este proceso. Se deben estudiar y tener en cuenta los cortes de las piedras y sus características texturales (sus planos de estratificación, su foliación, el diaclasado). Esto no es importante solamente debido a razones estéticas. Las rocas son materiales desiguales que varían sus propiedades con la orientación.

El estado actual de las investigaciones sobre las piedras habilita la selección de las variedades de rocas que sean las idóneas para cada ambiente. Asimismo, hoy día se puede elegir, dentro de una determinada clase de piedra, las variedades de mayor durabilidad. Para efectuar la reposición es recomendable efectuar un cajeado para alojar la pieza.

Si bien lo que se busca es que la pieza de reposición o de sustitución sea lo más parecida posible a la original, siempre se debe marcar la diferencia de las piedras nuevas y de las viejas.

Esto permitirá realizar un seguimiento posterior del tratamiento y una evaluación de los resultados de la intervención.

Si se tratara de una construcción con valor artístico y/o valor histórico, el público visitante debería ser capaz, también, de reconocer cuando una piedra no es la original.



## 4.5. REINTEGRACIÓN Y RECONSTRUCCIÓN

La finalidad de este proceso consiste en recuperar volúmenes o formas que se hayan perdido de las construcciones de piedra.

Para llevar adelante la reconstitución se utilizan MORTEROS, PIEDRAS NATURALES TALLADAS O REPRODUCCIONES MOLDEADAS ARTIFICIALES. La reconstrucción mediante morteros se emplea cuando el contorno de la piedra ha disminuido sus dimensiones, debido a las alteraciones sufridas.

Se debe aplicar un mortero, mediante llana o cualquier otro tipo de útil con la misma finalidad, para reconstruir el perfil original de los elementos que se encuentran alterados.

### MORTEROS.

Se moldean y se tallan *in situ*. Esto permite pequeñas recuperaciones sobre las piezas. Pero simultáneamente se logra respetar las partes de los originales que permanecen inalteradas.

Los morteros pétreos se pueden elegir entre los morteros industriales o, por el contrario, formulado de manera específica por el taller de restauración. Esta opción permite que los morteros se adapten mejor a las condiciones concretas de cada construcción.

Los morteros de restitución deben tener una densidad y resistencia menores o iguales que los de la piedra original. Esto evita que las incorporaciones creen tensiones en las piedras.

Este tipo de reconstrucción se apoya por trabajos de moldeado de caucho natural látex que se refuerza con fibra de vidrio y resinas poliéstericas. Estos compuestos se utilizan como encofrado de los elementos que se incorporan.



Los morteros comercializados se basan en conglomerantes minerales o sintéticos y polvo de piedra de coloración, textura y tipo similar a la original.

En general, los ligantes de los morteros suelen ser CALES, CALES HIDRÁULICAS, YESOS Y CEMENTO PÓRTLAND.

Un problema que presenta la cal grasa es que necesita para fraguar el contacto con el anhídrido carbónico del aire y además, debe estar lejos de la humedad. Como estas condiciones son difíciles de cumplir, se suele encontrar cal sin fraguar en el interior de muros pétreos antiguos. Para utilizar la cal como ligante de mortero, se la debe mezclar con un árido.

De lo contrario, se abrirían grietas de retracción durante el fraguado por el proceso de retraimiento que sufre. El fraguado de la cal es dificultoso y su conocimiento no está muy extendido.

Cuando se utiliza cal mezclada con un árido en un mortero, el fraguado se produce porque el ligante de cal se retira de los espacios entre los granos del árido hacia sus uniones.

Así los cementa y permite que se abra una porosidad por donde se elimina la humedad y penetra el aire. Este es el modo en que el fraguado procede al interior del muro. Las proporciones de agua y de árido son importantes para el fraguado.

Al ser la cal problemática de fraguar, son más utilizadas las cales hidráulicas como ligantes de los morteros de restitución.

- **CALES HIDRÁULICAS.** Son cales adicionadas con materiales que contienen sílice y/o alúminas reactivas. Estas sustancias reaccionan con la cal –produciendo un primer fraguado– incluso en presencia de humedad. El fraguado se da mediante la formación de silicatos y aluminatos cálcicos hidratados. Se produce un segundo fraguado más lento y posterior mediante el proceso de carbonatación del hidróxido cálcico excedente.

- CEMENTO PÓRTLAND. Fragua rápidamente con el agua. Esto origina una masa dura y rígida, frecuentemente más resistente en sus propiedades mecánicas que la propia piedra.

El cemento Pórtland se ha contraindicado numerosas veces para los trabajos de restauración. Esto se debe a que transmite las tensiones hacia la piedra por ser más rígido y resistente que ella, lo que produce tensiones. Además, favorece la aparición de humedades por condensación y aporta sales solubles dañinas que proceden de las cenizas de combustión del proceso de calcinación o de la arcilla que se le agrega.

Los morteros de restauración consisten, en conclusión, de una carga de piedra molida similar o igual a la original más un ligante. Ese ligante se basa en cal y cemento Pórtland, con una fracción de resina que facilita su adherencia y aumenta sus propiedades mecánicas.

Un buen mortero tiene las propiedades del sustrato pétreo y mantiene una buena adherencia. Además, debe ser menos rígido y menos resistente que la piedra y debe mantener propiedades hídricas buenas para no provocar la retención de sales y de humedades.

Por último, una técnica alternativa a la recomposición por morteros que se realiza *in situ*, es la reproducción en taller gracias al MOLDEADO EN CAUCHO DE SILICONA Y CHAPAS MECANIZADAS DE FIBRA DE VIDRIO CON RESINAS EPOXÍDICAS.



IMAGEN 208. Molde de silicona para rescatar lo que queda de la puerta de balcón sobre fachada.

Esta resina, si se combina con la cámara de vacío y la máquina reproductora de volteo, permite conseguir una fidelidad extraordinaria si se trata de réplicas.



En el caso de que se esté reconstruyendo una obra artística, y a diferencia de los morteros de cal y cemento, estos moldeados logran reproducir la calidad expresiva del original. Un último tipo de reconstitución se puede hacer utilizando TÉCNICAS TRADICIONALES DE CANTERÍA Y TALLADO DE PIEDRA.

Sin embargo, suelen existir dificultades para encontrar la misma clase de piedra ya que generalmente, las canteras están agotadas. Incluso tratándose de un material similar, el aspecto estético de la piedra recién tallada se distancia mucho de la textura y cromatismos que poseen las piedras originales. Estas características únicas son marcas del paso del tiempo y de la historia de la construcción.

De este modo, las recomposiciones quiebran la armonía estética. Una dificultad añadida es la pérdida de la tradición de los oficios artesanales, que redundará en problemas para encontrar tallistas finos en piedra.

## 5. MANTENIMIENTO Y PREVENCIÓN

Estos dos procesos tienen por objetivo que los resultados que se obtengan de los tratamientos aplicados sean efectivos y duraderos.

Asimismo, intentan que el deterioro de la piedra se ralentice. El deterioro de las construcciones es muy rápido en las zonas industriales y urbanas, debido a los efectos de la atmósfera contaminada.

Es en estos lugares donde se debe prestar más atención a la prevención y mantenimiento de las construcciones pétreas. El mantenimiento debe incluir revisiones periódicas de las construcciones y el control de los factores de alteración de las piedras.

Se deben controlar drenajes de agua de las cornisas, las terrazas y de cualquier otro lugar donde haya paso de humedades. La prevención tiene que ver con registrar los parámetros medioambientales y de los contaminantes de la atmósfera que rodean a la construcción.

Así, se pueden tomar las medidas que sean necesarias para evitar males futuros, si se detectan cambios dañinos potenciales para las piedras. Los datos se deben correlacionar entre sí y con las lesiones que se observan en las construcciones.

Cada construcción pétreas debe tener un programa de mantenimiento específico. Lo mismo sucede con la conservación preventiva.

En esos programas se definen los parámetros que se deben medir y seguir periódicamente. Los resultados que arrojen las investigaciones indicarán la dirección que se debe tomar para implementar las medidas que eviten el deterioro y logren un mantenimiento óptimo.





## CONCLUSIONES

Este trabajo surge como una inquietud personal por mundo de la conservación del patrimonio arquitectónico, siguiendo esto hemos intentado plasmar la importancia de los materiales pétreos en la construcción, así como su conservación y restauración.

En él hemos hecho de manera sencilla y sucinta, una recopilación de los diferentes factores de alteración, así como sus correspondiente patologías, siendo éstas diagnosticadas y tratadas por una gran variedad de técnicas reflejadas en el trabajo.

Esperamos que esto haya servido como una pequeña introducción para todos aquellos estudiantes que inicien su conocimiento en el mundo de la restauración de materiales pétreos.

## GLOSARIO

**Ágata:** No es un mineral específico, sino un conjunto de variedades microcristalinas del cuarzo (sílice).

**Álcalis:** Son óxidos, hidróxidos y carbonatos de los metales alcalinos. Actúan como bases fuertes y son muy hidrosolubles. De tacto jabonoso, pueden ser lo bastante corrosivos como para quemar la piel, al igual que los ácidos fuertes.

**Alótropo:** Es la propiedad de algunos elementos químicos de poseer estructuras químicas diferentes.

**Andesita:** Es una roca ígnea volcánica de composición media.<sup>4</sup> Su composición mineral comprende generalmente plagioclasas y varios otros minerales ferromagnéticos como piroxeno, biotita y hornablenda.

**Anfibolita:** Es un tipo de roca metamórfica compuesta en su mayor parte de minerales anfíboles. Son las rocas más antiguas encontradas, con una edad aproximada de entre 4.200 y 4.300 millones de años.

**Apatito:** Es un mineral con cristales hexagonales y dureza 5 en la escala de Mohs.

**Azufre:** El azufre es un elemento químico de número atómico 16 y símbolo S. Es un no metal abundante con un olor característico. El azufre se encuentra en forma nativa en regiones volcánicas y en sus formas reducidas formando sulfuros y sulfosales o bien en sus formas oxidadas como sulfatos.

**Bacterias sulforredutoras:** Las bacterias reductoras de sulfato comprenden varios grupos de bacterias que utilizan el sulfato como agente oxidante, reduciéndolo a sulfuro.

**Baritina:** Es un mineral de la clase de los sulfatos y del tipo  $AXO_4$ . Químicamente es el sulfato de bario ( $BaSO_4$ ). Es la principal mena del bario.

**Basalto:** El basalto es una roca ígnea volcánica de color oscuro, rica en silicatos de magnesio y hierro y bajo contenido en sílice, que constituye una de las rocas más abundantes en la corteza terrestre.

**Blástesis:** Es el proceso de crecimiento y formación de los cristales.

**Brecha:** Es una roca sedimentaria detrítica compuesta aproximadamente en un 50 % de fragmentos angulares de roca de tamaño superior a 2 milímetros unidos por un cemento natural.

**Bujarda:** Es una herramienta empleada en cantería para labrar la piedra. Se utiliza para acabados en superficies que se desean rugosas.

**Calcita:** La calcita es un mineral de la clase 05 de la clasificación de Strunz, los llamados minerales carbonatos y nitratos. A veces se usa como sinónimo caliza, aunque es incorrecto pues ésta es una roca más que un mineral.



**Caliza:** Es una roca sedimentaria compuesta mayoritariamente por carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), generalmente calcita. También puede contener pequeñas cantidades de minerales como arcilla, hematita, siderita, cuarzo, etc., que modifican el color y el grado de coherencia de la roca.

**Caolín:** Es una arcilla blanca muy pura que se utiliza para la fabricación de porcelanas y de aprestos para almidonar.

**Clasificación de Strunz:** Es un sistema de clasificación, usado universalmente en Mineralogía que se basa en la composición química de los minerales.

**Clinómetro:** Es un aparato de metal que se utiliza para medir el ángulo desde la vertical.

**Conglomerado:** Es una roca sedimentaria de tipo detrítico formada mayoritariamente por clastos redondeados tamaño grava o mayor ( $>2$  mm).

**Corindón:** Es un mineral del grupo IV (óxidos) según la clasificación de Strunz. Está formado por óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ).

**Cuarcita:** Es una roca metamórfica dura con alto contenido de cuarzo. En composición la mayoría de las cuarcitas llegan a ser más de 90% de cuarzo y algunas incluso 99%.

**Cuarzo:** Es un mineral compuesto de sílice ( $\text{SiO}_2$ ). Tras el feldespato es el mineral más común de la corteza terrestre estando presente en una gran cantidad de rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias.

**Diaclasa:** Es una fractura en las rocas que no va acompañada de deslizamiento de los bloques que determina, no siendo el desplazamiento más que una mínima separación transversal.

**Diamante:** Es uno de los alótropos del carbono mejor conocidos, cuya dureza y alta dispersión de la luz lo hacen útil para aplicaciones industriales y joyería. El diamante es el mineral natural más duro conocido, lo que lo convierte en un abrasivo excelente y le permite mantener su pulido y lustre extremadamente bien. No se conocen sustancias naturales que puedan rayar, o cortar, un diamante.

**Diorita:** Es una roca plutónica de composición intermedia compuesta generalmente de dos tercios de plagioclasa y un tercio de minerales oscuros como hornablenda, biotita y a veces piroxeno.

**Dolomía:** Es una roca sedimentaria de origen químico compuesta básicamente de dolomita, cuya composición química es carbonato de calcio y magnesio.

**Eflorescencia:** Es la propiedad que poseen algunos minerales y sustancias químicas (hidratos) de reducirse a polvo por sí mismos por pérdida de agua de cristalización al ser expuestos al aire.



**Esquisto:** Constituye un grupo de rocas metamórficas de grado medio, notables principalmente por la preponderancia de minerales laminares tales como la mica, la clorita, el talco, la hornablenda, grafito y otros.

**Éster:** Son compuestos orgánicos derivados de ácidos orgánicos o inorgánicos oxigenados en los cuales uno o más protones son sustituidos por grupos orgánicos alquilo.

**Estuco:** Es una pasta de grano fino compuesta de cal apagada (normalmente, cales aéreas grasas), mármol pulverizado, yeso, pigmentos naturales, etc. que se endurece por reacción química al entrar en contacto el carbonato cálcico de la cal con el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y se utiliza sobre todo para enlucir paredes y techos.

**Feldespatos:** Son un grupo de minerales tecto y aluminosilicatos que corresponden en volumen a tanto como el 60% de la corteza terrestre

**Fluorita:** Es un mineral del grupo III (halogenuros) según la clasificación de Strunz, formado por la combinación de los elementos calcio y flúor, de fórmula  $\text{CaF}_2$

**Fractura concoidea:** Es un tipo de rotura propia de materiales frágiles, de composición homogénea, pero amorfa (isótropa), que al trocearse no siguen planos naturales de separación.

**Gabro:** Es una roca ígnea plutónica compuesta principalmente de plagioclasa cálcica y piroxeno en proporciones de volumen similares.

**Gneis:** Es una roca metamórfica compuesta por los mismos minerales que el granito (cuarzo, feldespato y mica) pero con orientación definida en bandas, con capas alternas de minerales claros y oscuros.

**Goetita:** Es un mineral del grupo IV (óxidos e hidróxidos), según la clasificación de Strunz.

**Granito:** Es una roca ígnea plutónica constituida esencialmente por cuarzo, feldespato y mica.

**Hematites:** Es un mineral compuesto de óxido férrico, cuya fórmula es  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  y constituye una importante mena de hierro ya que en estado puro contiene un 70% de este metal.

**Hidrofóbo:** Se aplica a aquellas sustancias que son repelidas por el agua o que no se pueden mezclar con ella. Un ejemplo de sustancias hidrófobas son los aceites.

**Isotropía:** Es la característica de los cuerpos cuyas propiedades físicas no dependen de la dirección en que son examinadas.

**Jabelga:** Es una mezcla de cal, polvo de mármol y agua, muy similar al estuco pero a diferencia de éste, la consistencia de aplicación no es la de un mortero o pasta sino la de una pintura.



**Lignito:** Es un carbón mineral que se forma por compresión de la turba, convirtiéndose en una sustancia desmenuzable en la que aún se pueden reconocer algunas estructuras vegetales.

**Liquen:** Son organismos que surgen de la simbiosis entre un hongo llamado micobionte y un alga o cianobacteria llamada ficobionte.

**Litificación:** Proceso, generalmente de compactación y cementación, de conversión de los sedimentos en rocas sedimentarias.

**Litología:** Es la parte de la geología que estudia a las rocas especialmente de su tamaño de grano, del tamaño de las partículas y de sus características físicas y químicas.

**Litosfera:** es la capa sólida superficial de la Tierra, caracterizada por su rigidez.

**Magnetita:** Es un mineral de hierro constituido por óxido ferroso-diférrico ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ).

**Mármol:** Es una roca metamórfica compacta formada a partir de rocas calizas que, sometidas a elevadas temperaturas y presiones, alcanzan un alto grado de cristalización.

**Meteorización:** Es la desintegración, descomposición y disgregación de una roca en la superficie terrestre o próxima a ella como consecuencia de su exposición a los agentes atmosféricos y físico-químicos, con la participación de agentes biológicos.

**Mica:** Son minerales pertenecientes a un grupo numeroso de silicatos de alúmina, hierro, calcio, magnesio y minerales alcalinos caracterizados por su fácil exfoliación en delgadas láminas flexibles, elásticas y muy brillantes, dentro del subgrupo de los filosilicatos.

**Obsidiana:** Llamada a veces vidrio volcánico, es una roca ígnea volcánica perteneciente al grupo de los silicatos, con una composición química de silicatos aluminicos y un gran porcentaje (70% o mayor) de óxidos sílicos.

**Ópalo:** Es un mineraloide del grupo IV (óxidos), según la clasificación de Strunz relacionado con los cuarzos, aunque no es un cuarzo, y que se caracteriza por su brillo y astillabilidad.

**Orogenia:** Es la formación o rejuvenecimiento de montañas y cordilleras causada por la deformación compresiva de regiones más o menos extensas de litosfera continental.

**Ortoclasa:** Es un mineral de la clase 9 (silicato)s, subgrupo tectosilicatos, y dentro de ellos pertenece a los feldespatos, según la clasificación de Strunz.

**Paleoambiental:** Es una reconstrucción de un ambiente que existió en algún momento del pasado geológico.

**Pátinas:** Son capas o películas superficiales que representan el estado de envejecimiento de un material. Su formación no implica necesariamente procesos de degradación o deterioro





**Peridotita:** Es una roca ígnea plutónica formada por lo general de olivino (peridoto) acompañado de piroxenos y anfíboles. Es muy densa y de coloración oscura. Se cree que es la roca mayoritaria en la parte superior del manto terrestre.

**Pirita:** Conocida como "el oro de los pobres", llamada así por su increíble parecido con el oro, es un mineral del grupo de los sulfuros cuya fórmula química es  $\text{FeS}_2$ .

**Pirolusita:** Es un mineral del grupo de los óxidos. Químicamente es dióxido de manganeso, que puede presentar una gran cantidad de hábitos cristalinos, aunque en general se presenta en forma de agregados cristalinos fibrosos.

**Piroxenita:** Es una roca ígnea plutónica de color oscuro compuesta principalmente por piroxeno con cantidades menores de olivino, biotita y anfíbol.

**Pizarra:** Es una roca metamórfica homogénea formada por la compactación de arcillas. Se presenta generalmente en un color opaco azulado oscuro y dividida en lascas u hojas planas siendo, por esta característica, utilizada en cubiertas y como antiguo elemento de escritura.

**Policromía:** Arte de pintar o decorar con colores ciertas partes de los edificios, estatuas, bajorrelieves, etc.

**Psicrómetro:** Es un aparato utilizado en meteorología para medir la humedad relativa o contenido de vapor de agua en el aire.

**Quelante:** Antagonista de metales pesados, es una sustancia que forma complejos con iones de metales pesados. Una de las aplicaciones de los quelantes es evitar la toxicidad de los metales pesados para los seres vivos.

**Resina epoxi:** Es un polímero termoestable (la resina) que se endurece cuando se mezcla con un agente catalizador o endurecedor. Aplicaciones como pinturas, adhesivos, materiales compuestos, etc.

**Riolita:** Es una roca ígnea volcánica de color gris a rojizo con una textura de granos finos o a veces también vidrio y una composición química muy parecida a la del granito.

**Rocas Extrusivas:** Son aquellas rocas ígneas que se formaron por el enfriamiento de lava en la superficie terrestre.

**Rocas Intrusivas:** Son las que se forman a partir de un enfriamiento lento, a gran profundidad y en grandes masas del magma.

**Sedimentos:** Es un sólido acumulado sobre la superficie terrestre (litósfera) derivado de las acciones de fenómenos y procesos que actúan en la atmósfera, en la hidrosfera y en la biosfera.

**Sepiolita:** Es un mineral del grupo VIII (Filosilicatos), según la clasificación de Strunz.

**Serpentinita:** Este mineral fibroso posee unas características físicas que lo hacen muy adecuado para el labrado de figuras y objetos ornamentales

**Siderita:** Es un mineral de la clase 05 (carbonatos), según la clasificación de Strunz.

**Sienita:** Es una roca ígnea plutónica constituida por minerales como feldespato, oligoclasas, albita, y minerales máficos como biotita y piroxeno (augita).

**Silicato:** Son el grupo de minerales de mayor abundancia, pues constituyen más del 95% de la corteza terrestre, además del grupo de más importancia geológica por ser petrogénicos, es decir, los minerales que forman las rocas. Todos los silicatos están compuestos por silicio y oxígeno.

**Sulfato:** Son las sales o los ésteres del ácido sulfúrico. Contienen como unidad común un átomo de azufre en el centro de un tetraedro formado por cuatro átomos de oxígeno.

**Sulfuro:** Es la combinación del azufre con un elemento químico o con un radical.

**Talco:** Es un mineral de la clase 9 (silicatos), según la clasificación de Strunz, de color blanco a gris azul. En la escala de Mohs se toma como patrón de la menor dureza posible, asignándosele convencionalmente el valor 1.

**Termoplástico:** Es un plástico que, a temperaturas relativamente altas se vuelve deformable o flexible, se derrite cuando se calienta y se endurece en un estado de transición vítrea cuando se enfría lo suficiente.

**Toba volcánica:** Es un tipo de roca ígnea volcánica, ligera, de consistencia porosa, formada por la acumulación de cenizas u otros elementos volcánicos muy pequeños expelidos por los respiraderos durante una erupción volcánica.

**Topacio:** Es un mineral del grupo VIII (silicatos), según la clasificación de Strunz. En la escala de Mohs le corresponde dureza de 8. Sin embargo, fractura fácilmente y por esta razón es difícil de trabajar.

**Traquita:** Es una roca ígnea volcánica compuesta de feldespato potásico y otros minerales como plagioclasa, biotita, piroxeno y hornablenda.

**White Spirit:** Es un disolvente extraído del petróleo, incoloro o muy levemente amarillento, olor a queroseno, muy poco soluble en agua y con un rango de ebullición de 130–231°C. Un uso moderno es como disolvente (sustituyendo al aguarrás o trementina) en la pintura artística y procesos textiles debido a que es más barato que éste y no amarillea con el tiempo.

**Xileno:** Los xilenos son buenos disolventes y se usan como tales. Además forman parte de muchas formulaciones de combustibles de gasolina donde destacan por su elevado índice octano.

## ÍNDICE DE IMÁGENES

Imagen 1. Piedra caliza. Mármol. ....	9
Imagen 2. Cuarzita. ....	9
Imagen 3. Roca Poliminerálica. Granito. ....	10
Imagen 4. Formación de minerales y rocas. ....	12
Imagen 5. El yeso es un mineral de baja densidad. 2,31 g/cm <sup>3</sup> . ....	15
Imagen 6. La Baritina es un mineral de alta densidad. 4,47 g/cm <sup>3</sup> . ....	15
Imagen 7. Azufre. Mineral diamagnético. ....	15
Imagen 8. Magnetita. Mineral ferromagnético. ....	15
Imagen 9. Turmalina. Mineral piroeléctrico. ....	16
Imagen 10. Silvina. ....	18
Imagen 11. Uraninita. ....	19
Imagen 12. OPACO. Pirita. ....	19
Imagen 13. TRANSLÚCIDO. Yeso. ....	19
Imagen 14. TRANSPARENTE. Cuarzo. ....	19
Imagen 15. Fluorita. ....	20
Imagen 16. Imagen actual de la Mina de Lignito en As Pontes. A Coruña. ....	23
Imagen 17. Mina de Lignito en As Pontes, A Coruña. ....	23
Imagen 18. El ciclo de las rojas. ....	25
Imagen 19. Límite convergente. Placa oceánica que desciende y se funde. ....	27
Imagen 20. Límite divergente. El magma asciende y el fondo oceánico se expande. .	27
Imagen 21. Interior de continente, el denominado punto caliente. ....	28
Imagen 22. Rocas ígneas intrusivas y extrusivas. ....	30
Imagen 209. Esquema de clasificación de rocas ígneas. ....	31
Imagen 24. Proceso de formación de rocas sedimentarias. ....	32
Imagen 25. Principales clases de Sedimentos y Rocas sedimentarias. ....	34
Imagen 26. a) Clastos redondeados. Fotomicrografía de una arenisca con clastos con morfología redondeada. B) Clastos angulosos. Fotomicrografía de una arenisca con clastos. ....	34



Imagen 27. a) Textura con empaquetamiento grano-sostenido, b) textura con empaquetamiento matriz-sostenido. ....	35
Imagen 28. Clasificación de sedimentos químicos y bioquímicos. ....	36
Imagen 29. Hulla. ....	37
Imagen 30. Antracita. ....	37
Imagen 31. Lignito ....	37
Imagen 32. Caliza Coralina. Contienen restos de esqueletos de corales, briozoos, bivalvos, moluscos, etc. ....	38
Imagen 33. Lumaquelas. Acumulación de restos de conchas cementadas. ....	38
Imagen 210. Calizas Pelágicas. Acumulación de esqueletos de foraminíferos y flagelados. ....	39
Imagen 35. Tobas. Precipitados de carbonato sobre tallos de plantas. ....	39
Imagen 36. Calizas Algales ....	39
Imagen 37. Dos tipos principales de metamorfismos. El regional abarca grandes sectores de la corteza, en cambio el de contacto se localiza en los bordes de las intrusiones magmáticas. ....	43
Imagen 38. Clasificación de rocas metamórficas ....	45
Imagen 39. Los cuatro tipos de texturas Cristaloblásticas ....	46
Imagen 40. Textura lepidoblástica. Micacita ....	47
Imagen 41. Textura nematoblástica. Anfibolita. ....	48
Imagen 42. Textura porfidoblástica. ....	49
Imagen 43. Restos de la antigua ciudad de Ampurias. ....	54
Imagen 44. Templo del Partenón, situado en la Acrópolis, Atenas, Grecia. ....	54
Imagen 45. Fachada del Colegio de San Ildefonso, Madrid. ....	55
Imagen 46. Catedral de Tarazona, construida con arenisca local poco resistente a la alteración. Mucha de la piedra ha tenido que ser sustituida. ....	56
Imagen 47. Pirámide Maya Gran Jaguar en Tikal, Guatemala. ....	57
Imagen 48. Graderio del Gran Jaguar, se puede apreciar el deterioro de la caliza. ....	57
Imagen 49. Reutilización de materiales romanos en la alcazaba de Mérida. ....	58
Imagen 50. Pórtico de la iglesia de San Vicente integrado por granito, para la ornamentación fina se ha utilizado caliza. ....	59



Imagen 51.Ornamentaciones en el granito de la portada churrigueresca del Antiguo Hospicio de Madrid. ....	60
Imagen 52.Bolos graníticos de superficie. ....	61
Imagen 53.Zonas de cantera en la antigüedad y en la actualidad. ....	62
Imagen 54.Cantera de pizarra en Ponferrada, León. ....	63
Imagen 55.Eschema del funcionamiento tradicional de las canteras. ....	64
Imagen 56.Eschema del funcionamiento moderno de una cantera. ....	65
Imagen 57.Tipos de hilo diamantado. ....	66
Imagen 58.Corte paralelo al frente una vez perforado el barreno horizontal desde la trinchera. ....	66
Imagen 59. Corte horizontal con hilo. ....	67
Imagen 60.Cortabloques monodisco. ....	68
Imagen 211.Cortabloques multidisco. ....	68
Imagen 212.Distintos tipos de bujardas y sus acabados superficiales. ....	69
Imagen 213.Aplicación de Resinas ....	70
Imagen 64.Sillar, elementos geométricos. ....	73
Imagen 65.Muro de mampostería ordinaria con mortero. ....	74
Imagen 66.Muro de mampostería careada con junta en seco ....	75
Imagen 67.Muro de mampostería con junta de mortero rehundida 2cm. ....	76
Imagen 68.Ejemplo de Mampostería mixta. Antiguo Matadero de Arganzuela, Madrid. ....	76
Imagen 69.Mampostería mixta, compuesta por mampuestos alternados con ladrillos. ....	76
Imagen 70.Ejemplo de obra realizada con sillares .Ermita de San Bartolomé de Utero del S. XV, Barranco del Río Lobos, Soria. ....	77
Imagen 71.Ejemplo de sillares almohadillados. Palacio de Carlos V, Madrid. ....	79
Imagen 72.Pavimento interior realizado con mármol de Macael. ....	80
Imagen 73.Enlosado de granito. ....	80
Imagen 74.Enlosado con travertino. ....	80
Imagen 75.Ejemplo de pavimento adoquinado. ....	81





Imagen 76. Ejemplo de pavimento veneciano, aunque más comúnmente conocido por ser un terrazo ejecutado in situ. ....	82
Imagen 77. Mosaico de lascas encontrado en la antigua ciudad Italiana de Ercolano. ....	83
Imagen 78. Losas de granito. ....	84
Imagen 79. Escalera compuesta por peldaños de granito. ....	84
Imagen 80. Casa con tejado de pizarra en Ibias. Asturias. ....	86
Imagen 81. Pizarra una vez los cantos han sido cortados. ....	87
Imagen 82. Colocación de tejado de pizarra. ....	87
Imagen 83. Diferentes formas de las pizarras. ....	87
Imagen 84. Pizarras con cantos vivos. ....	87
Imagen 85. Aplacado de cuarcita, colocado a trabajunta sujeto a la fachada directamente con mortero. ....	88
Imagen 86. Aplacado tomado con mortero. ....	89
Imagen 87. Aplacado colocado mediante montantes y anclajes mecánicos. ....	89
Imagen 88. Microscopio óptico. Usado en la identificación de minerales. ....	97
Imagen 89. Métodos de ensayos hídricos. ....	99
Imagen 90. Ensayo de absorción a la pipa. ....	101
Imagen 91. Equipo de intrusión-extrusión de mercurio. ....	102
Imagen 92. Con cada incremento de presión el mercurio (punteado fino) penetra en poros de menor diámetro de la muestra (blanco). ....	102
Imagen 93. Prensa hidráulica utilizada en los ensayos de resistencia mecánica a compresión. ....	107
Imagen 94. Esquema de ensayo de desgaste por rozamiento. ....	108
Imagen 95. Microdurómetro. ....	109
Imagen 96. Lápicas de Mohs. ....	109
Imagen 97. Péndulo normalizado. ....	110
Imagen 98. Mármol con presencia de óxidos de hierro formando venas. ....	114
Imagen 99. Mármol de Macael con restos de piritas. ....	115
Imagen 100. Caolín. ....	116

Imagen 101. Formación de costras y ennegrecimientos en zonas protegidas.....	118
Imagen 102. Ensuciamiento producido por carbonatación y sulfatación. Antes y después. ....	121
Imagen 103. Deterioro en las zonas inferiores de las columnas en el claustro de San Juan de Duero en Soria. ....	125
Imagen 104. El claustro de San Juan de Duero en Soria.....	125
Imagen 105. Cartografía de distribución de contenido en sales de la puerta sur este del Claustro de San Juan. ....	126
Imagen 106. Eflorescencias por cristalización de sales. ....	126
Imagen 107. Costras negras por cristalización de sales .....	126
Imagen 108. Alveolización por cristalización de sales, Colegiata de Revillagigedo. ..	128
Imagen 109. Detalles de zonas alveolizadas correspondientes a la torre derecha y a una de las columnas de la entrada de la Colegiata de Revillagigedo, Gijón .....	128
Imagen 110. Colegiata de Revillagigedo. Gijón después de su restauración .....	129
Imagen 111. Pináculo de caliza del Patio trilingüe del Colegio de San Ildefonso en Alcalá de Henares, una vez restaurado.....	131
Imagen 112. Pináculo de caliza del patio trilingüe del Colegio de San Ildefonso, dañado por heladas. ....	131
Imagen 113. Alteración diferencial frente a heladas entre el granito y una caliza compacta en un pavimento exterior, situado en la Universidad de Burgos.....	132
Imagen 114. Fisura producida por bruscos cambios térmicos, en una estatua de la Catedral de Burgos.....	133
Imagen 115. Erosión eólica sobre hiladas superiores en muro de piedra. ....	134
Imagen 116. Detalle del deterioro y de la formación de capa de arenisca en la Iglesia de San Vicente, San Sebastián.....	137
Imagen 117. Microscopía electrónica. Hifas de hongos sobre la capa de arenisca deteriorada (x50). ....	137
Imagen 118. Colonización por algas verdes en una filtración de humedades. ....	138
Imagen 119. Líquenes blancos en muro de piedra. ....	139
Imagen 120. El Castillo de San Petri en Cádiz es un buen ejemplo de edificación muy influenciada por su situación, afectada por los vientos del Levante cargados de polvo. ....	141
Imagen 121. Aspecto de la Portada de Santa María en la Catedral de Burgos. ....	145



Imagen 122. Pátina cromática de herrumbre localizada en el exterior de una vidriera en la capilla de San Ana, Burgos. ....	146
Imagen 123. Pátina cromática verde por migración de cobre de la toma de tierra en la catedral de Burgos. ....	146
Imagen 124. Pátina biológica, fundamentalmente liquen, proporciona su aspecto dorado a la Catedral de Santiago de Compostela .....	147
Imagen 125. Pátinas biológicas sobre granito, alterando totalmente el aspecto de la roca fresca. En este caso se trata de colonia de liquen blanco y musgo. ....	147
Imagen 126. Patinas naturales por oxidación de minerales de hierro y magnesio sobre traquita. ....	147
Imagen 127. Depósito de hollín en la parte que no recibe el lavado de la lluvia. ....	148
Imagen 128. Mancha en muro producida por filtración de humedad. ....	148
Imagen 129. Eflorescencia .....	149
Imagen 130. Eflorescencia por debajo del mortero de restauración, con el consecuente desprendimiento de material y deterioro de la piedra. ....	149
Imagen 131. Eflorescencias de sulfatos sobre arenisca .....	150
Imagen 133. Eflorescencias de yeso por removilización de la capa de preparación, en el Pórtico de la Gloria en la Catedral de Santiago de Compostela. ....	150
Imagen 134. Depósito superficial sobre granito. ....	151
Imagen 135. Alveolización de una caliza. ....	152
Imagen 136. Descamación por cristalización de sales. ....	153
Imagen 137. Muro en avanzado proceso de desplazación. Catedral de Burgos. ....	153
Imagen 138. Costras comenzando a levantarse del sustrato pétreo, dando lugar a ampollas y descamaciones. ....	154
Imagen 139. Diversos aspectos de costa negra y lesiones asociadas en la iglesia de San Nicolás de Bari en Avilés. ....	155
Imagen 140. Costra biótica formada por liquen blanco y verde, en Santa María de Oia (Pontevedra) .....	156
Imagen 141. Eflorescencias que colaboran en la formación de ampollas. ....	156
Imagen 142. Disgregación en areniscas. ....	157
Imagen 143. Arenización en granito. ....	157



Imagen 144. Detalle de la dolomía de Boñar, con una red de fisuras; aparecen superficies dentadas estiolíticas y fisuración con rellenos de arcillas, óxidos de hierro y carbonatos.....	159
Imagen 145. Detalle de la dolomía de Boñar, con una red de fisuras con relleno de carbonatos en un edificio de León.....	159
Imagen 146. Detalle de la dolomía de Boñar, mostrando fisuración natural. Algunas de sus fisuras aparecen rellenas y selladas, mientras que otras se encuentran abiertas. El desprendimiento de algunos fragmentos ha sido reparado con mortero.....	159
Imagen 147. Erosión por uso de la escalera. ....	160
Imagen 148. Erosión de una Arenisca. ....	160
Imagen 149. La pérdida de mortero de juntas ha provocado la concentración de esfuerzos fracturándose la pieza menos resistente. Alcazaba de Mérida.....	162
Imagen 150. Fractura antigua, de sillar, reparada con mortero portland, provocada por la mala respuesta ante deformaciones debidas al lavado de finos de los rellenos. Alcazaba de Mérida.....	163
Imagen 151. El rejuntado superficial con mortero portland efectuado no resuelve el problema real, de pérdida de juntas por filtraciones al relleno, que también lavan los finos y provocan movimientos. En este caso se reparó la lesión aparente pero no se efectuó un diagnóstico ni se actuó en consecuencia. Alcazaba de Mérida.....	163
Imagen 152. Fragmentación de sillares antes pequeños movimientos, al haberse perdido el mortero de junta. Los movimientos bien pueden ser de origen sísmico, quedando descartado el movimiento por tráfico al encontrarse en una zona rural. Iglesia de Quintanilla de las Viñas Burgos.....	163
Imagen 153. Izquierda, grieta de desarrollo vertical por presión de los rellenos en el Castillo de Jadraque. Derecha, abombamiento en la torre y grieta de desarrollo vertical por presión de los rellenos y lavado de finos en la alcazaba de Mérida. La grieta es antigua y se ha sellado con ladrillo.....	164
Imagen 154. Colapso por abombamiento .....	165
Imagen 155. Esquema de fisuras en las dovelas de la boquilla y descuelgue de dovelas .....	167
Imagen 156. Lesiones por sobrecarga en un puente en las proximidades de Villaescusa. Descuelgue de dovelas por descompresión de la clave de la bóveda.....	167
Imagen 157. Sistema Kárstico. ....	168
Imagen 158. Ciudad de Bam, Irán, antes y después del seísmo ocurrido en 2003. ....	171



Imagen 160. Las fisuras en los sillares del Acueducto de Segovia se han atribuido a colapso por concentración de esfuerzos en los puntos de contacto, agravado por las vibraciones derivadas del tráfico .....	173
Imagen 161. Decapación del mármol de Macael que compone las columnas del Patio de los leones de la Alhambra de Granada. Los daños sólo aparecen en la parte de las columnas que sufren exposición a la insolación directa.....	175
Imagen 162. En la Iglesia del Convento de San Agustín la escalera de subida al presbiterio y el relleno bajo la misma protegió la piedra del incendio. ....	176
Imagen 163. Oxidación en el empotramiento de la verja. ....	178
Imagen 164. Fractura del florón por oxidación del anclaje de hierro.....	178
Imagen 165. Oxidación en los anclajes y la consiguiente dilatación entre la piedra y el hierro han provocado la apertura de fisuras en la piedra. Catedral de Pamplona. ....	178
Imagen 166. Efecto de numerosos revocados con mortero portland .....	181
Imagen 167. Técnicas de inspección para determinar el movimiento de estructuras pétreas.....	187
Imagen 168. Deterioro provocado por la eliminación de una gárgola en el Palacio de Boadilla del Monte, Madrid.....	188
Imagen 169. Sicrómetro .....	190
Imagen 170. Retablo mayor de la Catedral de la Seo, Zaragoza .....	194
Imagen 171. Ejemplo de Fotogrametría. Retablo mayor de alabastro de la Seo de Zaragoza. ....	195
Imagen 172. Ejemplo de fotogrametría arquitectónica. ....	196
Imagen 173. Imagen termográfica de la columna central del Pórtico de la Gloria en la Catedral de Santiago. ....	197
Imagen 174. Imagen termográfica. ....	198
Imagen 175. Espectrorradiómetro. ....	199
Imagen 176. Ejemplo de cartografía de procesos y de daños .Iglesia de San Pablo Valladolid.....	200
Imagen 177. Cartografía de lesiones en la parte baja del cimborrio de la Catedral de BURGOS. ....	200
Imagen 178. Alzados de velocidad de propagación de ultrasonidos (izda.) y de patologías (centro). En ambos casos, los daños se localizan en los paños de sebka y dinteles de las ventanas superiores. Detalle de los deterioros (dcha.) Palacio de Don Pedro I, Sevilla .....	202





Imagen 179.Tomógrafo ultrasónico, utilizado en este caso para el análisis de la estructura interna de un árbol. ....	204
Imagen 180. Fisurómetro.....	205
Imagen 181.Deformómetro. ....	205
Imagen 182.Ensayo de permeabilidad con tubos de absorción. ....	206
Imagen 183. Imagen obtenida con microscopio de barrido.....	210
Imagen 184.Cartografía de daños (presencia de sales) en la Catedral del Salvador de Zaragoza. ....	220
Imagen 185.Con ayuda de una pistola, se proyecta la pasta de celulosa, todavía húmeda. Pasados diez minutos, se retira el material para aplicar un segundo apósito que realiza una limpieza en profundidad.....	221
Imagen 186.Medición de la concentración de sales. ....	221
Imagen 187.Cristalización de las sales.....	222
Imagen 188.Retirada del material aplicado para lograr la desalación.....	222
Imagen 189.Limpieza mediante agua nebulizada a alta presión. ....	226
Imagen 191.Máquina de limpieza con vapor de agua.....	227
Imagen 192.Desionizador de agua de la red para limpieza de agua nebulizada o atomizada .....	229
Imagen 193.Limpieza mediante agua nebulizada con difusores. ....	230
Imagen 194.Portada de Los Reyes de la Catedral de Palencia .....	231
Imagen 195.Limpieza con microcincel.....	232
Imagen 196.Limpieza con bisturí.....	233
Imagen 197.Limpieza manual. ....	233
Imagen 198. Limpieza con microchorro en el interior de la catedral de Logroño.....	235
Imagen 199.Limpieza mediante microchorro de arena. Antes y después. ....	235
Imagen 200. Descomposición de las micas negras del granito, por limpiezas efectuadas con ácido clorhídrico. ....	238
Imagen 201.Sosa Cáustica.....	239
Imagen 202.Manchas de óxido de hierro. ....	240
Imagen 203.Limpieza de granito mediante un biocida con posterior limpieza mecánica. ....	241
Imagen 204.Limpieza mediante ultrasonidos, agua - aire.....	243



Imagen 205.Limpieza mediante rayo láser. ....	244
Imagen 206. Columna de granito, limpiada mediante rayo láser. ....	245
Imagen 207.Limpieza de la piedra del Claustro de la Catedral de Oviedo .....	246
Imagen 208. Restauración de la cabeza de un relieve romano .....	255
Imagen 209.Molde de silicona para rescatar lo que queda de la puerta de balcón sobre fachada. ....	272



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.Elementos en la corteza terrestre .....	13
Tabla 2.Tabla Clasificación de las Rocas.....	24
Tabla 3.Curvas de variación aproximada de la presión, la temperatura y la gravedad con la profundidad.....	41
Tabla 4.Características principales de las rocas metamórficas más comunes.....	51
Tabla 5.Normativa aplicada a materiales pétreos de construcción. ....	94
Tabla 6.Normativa aplicada a materiales pétreos de construcción .....	95
Tabla 7.Factores de alteración de la piedra. ....	112

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1.Ciclo hídrico de la calcarenita de Novelda. ....	100
Gráfico 2.Resultado de porosimetría por intrusión de mercurio en una piedra de Novelda sin tratar. ....	103



## BIBLIOGRAFÍA

Esta bibliografía está dividida en varios bloques, en función de la naturaleza de la fuente.

### LIBROS

- Alcalde Moreno M., Villegas Sánchez R., Vale J.F, A. Martín Pérez (1990): *Diagnosis y tratamiento de la piedra*, Instituto de las Ciencias Eduardo Torroja.
- Alcalde Moreno M., Villegas Sánchez R. (2003): *Metodología de diagnóstico y evaluación de tratamientos para la conservación de edificios históricos*, Ed Comares.
- Helmut G.f. Winkler (1975): *Petrogénesis De Rocas Metamórficas*, Ed. H. Blume.
- Muñoz Hidalgo, M.; Muñoz Hidalgo, M. (1991): *Prevención y soluciones en patología estructural de la edificación*.
- García de Miguel, J.M, (2009): *Tratamiento y conservación de la piedra, el ladrillo y los morteros en monumentos y construcciones*. Ed Cyan.
- García de Miguel, J.M, (1975): *Petrología de rocas ígneas*, Ed Fundación Gómez Pardo.

### REVISTAS Y PUBLICACIONES

- Alonso, F. J.; Díaz-Pache, F. y Esbert, R. M.: *Interacción piedra-ambiente, 1ª parte: formas de alteración desarrolladas sobre la piedra de la Catedral de Burgos*. Departamento de Petrología. Facultad de Geología. Universidad de Oviedo.
- Alonso, F. J.; Mateo, F. Esbert, R. M.: *La limpieza con láser de la piedra del claustro de la catedral de Oviedo*.
- *Apuntes de Petrología*, Cátedra de Geología General, Universidad de Córdoba.
- Herráez J.A : *Proyecto de Conservación del Claustro de San Juan de Duero*, Sección de Conservación Preventiva del Instituto del Patrimonio Histórico Español.
- López Arce P. (2003): *Daños por cristalización de sales*, Instituto de Geociencias (CSIC-UCM), Dpto. de Geomateriales.
- Plaza Diez, O.: *Geología aplicada*. Universidad Politécnica de Madrid.
- Ramírez Oyanguren, P.; Alejano Monge, L. (2004): *Mecánica de Rocas. Fundamentos e ingeniería de taludes*.
- Revista del Instituto del Patrimonio Histórico Español Nº 2 (2003): *Criterios de intervención en materiales pétreos*.



- Rivas, T. : *Materiales pétreos graníticos. alteraciones, diagnosis y evaluación de tratamientos*. Grupo de investigación-Explotación de minas ETSI MINAS-UNIVERSIDAD DE VIGO.
- Valdeon L.; Esbert R. M, ; Marcos R.M: *La alveolización y otras formas de alteración desarrolladas sobre las areniscas del palacio de Revillagigedo de Gijón (Asturias)*. Departamento de Petrología. Facultad de Geología. Universidad de Oviedo.
- Varas Muriel M. J.(2004):*Técnicas de caracterización en materiales petreos. dos casos de estudio: fachada del palacio de Don Pedro I (Sevilla) y ábside de la iglesia de San Juan Bautista (Talamanca de Jarama, Madrid)*, Instituto de Geociencias (CSIC-UCM), Dpto. Geomateriales, y Facultad Ciencias Geológicas (UCM).
- Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos, (1995): *Patología, terapéutica y rehabilitación de edificaciones antiguas piedra*.

## TÉSIS Y PROYECTOS FIN DE CARRERA

- Bolivar Galiano, F. (1994): *Diagnosis y tratamiento del deterioro por microalgas en los Palacios Nazaries de la Alhambra*. Universidad de Granada.
- Concepción Rodríguez Pomares, O. (2010): *Técnicas y acabados de superficie sobre la escultura en piedra. investigación práctica con tratamientos químicos y mecánicos en mármol*. Universidad de Murcia.
- Maccarini Vefago, L.H. (2011): *El concepto de reciclabilidad aplicado a los materiales de construcción y a los edificios: propuesta de índices para evaluar la reciclabilidad de los sistemas constructivos*. UPC
- Pérez García, F. (2003): *Construcciones pétreas patología y técnicas de intervención*. EUAT.
- Rodríguez García M.R. (1999): *Características Técnicas de Rocas Ornamentales en la Edificación*.

## PÁGINAS WEB DE INTERÉS

- <http://edafologia.ugr.es/rocas/index.htm>
- <http://es.scribd.com/doc/101351937/Patologia-de-la-Piedra-y-otros-materiales-de-la-construccion>
- <http://roble.pntic.mec.es/~jfes0017/mineral.php?letra=s&orden=3347#3347>
- <http://unicum.cat/es/2011/09/la-galeria-del-castell-templer-de-corbera-d%E2%80%9999ebre-2/>
- <http://www.bdigital.unal.edu.co/1572/>
- <http://www.soloarquitectura.com/>





- <http://www.todogeologia.com/>
- [http://www.ugr.es/~agcasco/msecgeol/secciones/petro/pet\\_sed.htm](http://www.ugr.es/~agcasco/msecgeol/secciones/petro/pet_sed.htm)
- [http://www.epoxi.depintur.com/que\\_es\\_el\\_epoxi.html](http://www.epoxi.depintur.com/que_es_el_epoxi.html)
- <http://www.rae.es/rae.html>
- <http://es.wikipedia.org/wiki/Wikipedia:Portada>
- <http://www.construmatica.com/construpedia/Portada>



## AGRADECIMIENTOS

- A la Universidad de la Coruña y al órgano docente de la Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica.
- A Ramón Vázquez Fernández, profesor y tutor del proyecto.
- Al presente tribunal.